ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

СВЧ - ТЕХНИКА

ВЫПУСК 2 (533)

2017

2(533).indd 1 23.06.2017 10:19:43

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

СВЧ-ТЕХНИКА

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

Выпуск 2(533) **2017** **Издается с 1950 г.**

Главный редактор
д.т.н. **А.А. Борисов**

Редакционная коллегия:

к.т.н. **С.А. Зайцев** (*зам. главного редактора*),
к.т.н. **С.В. Щербаков** (*зам. главного редактора*),
Ю.А. Будзинский, к.ф.-м.н. **А.В. Галдецкий**,
Б.Ф. Горбик, д.т.н. **А.Д. Закурдаев**, к.т.н. **Н.П. Зубков**,
д.т.н. **С.С. Зырин**, к.т.н. **А.С. Котов**,
д.т.н. **П.В. Куприянов**, к.т.н. **В.Г. Лапин**,
д.т.н. **М.И. Лопин**, д.т.н. **Н.А. Лябин**, **В.М. Малыщик**,
д.т.н., профессор **П.П. Мальцев** (ИСВЧ ПЭ РАН), к.т.н. **П.М. Мелешкевич**,
д.т.н., профессор **В.П. Мещанов** (ОАО «ЦНИИИА»),
к.т.н. **А.Г. Михальченков**,
д.т.н. **С.П. Морев** (ФГУП «НПП «Торий»), **О.А. Морозов** (ЗАО «НПП «Магратеп»),
к.т.н. **В.Ю. Мякиньков**, д.ф.-м.н. **А.И. Панас**,
д.ф.-м.н. **А.Б. Пашковский**, к.ф.-м.н. **С.А. Плешанов**, **Е.Н. Покровский**,
к.т.н. **О.В. Поливникова**, к.т.н. **А.В. Потапов**,
д.т.н., профессор **Р.А. Силин.**, д.т.н. **К.Г. Симонов**,
В.П. Стебунов (*ответственный секретарь*),
д.т.н. **М.М. Трифонов** (ЗАО «НПП «Исток-Система»),
д.т.н., профессор **Н.Д. Урсуляк**

Журнал зарегистрирован Министерством Российской Федерации по делам печати, телерадиовещения и средств массовых коммуникаций (свидетельство ПИ № ФС 77-24651 от 6 июня 2006 г.).

Решением Президиума Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки Российской Федерации от 29 декабря 2015 г. научно-технический сборник «Электронная техника», серия 1 «СВЧ-техника», издаваемый АО «НПП «Исток» им. Шокина» с 1950 года, вновь включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук».

© АО «НПП «Исток» им. Шокина», 2017 г.

ELEKTRONNAYA TEKHNIKA

(Electronic Engineering)

SERIES 1

SVCH-TEKHNIKA

(Microwave Engineering)

COLLECTION OF RESEARCH & TECHNICAL ARTICLES

Issue 2(533) **2017** **Founded in 1950 г.**

Editor-in-chief
D.T.Sc. **A.A. Borisov**

Editorial staff:

C.T.Sc. **S.A. Zaitsev** (deputy editor-in-chief),
C.T.Sc. **S.V. Scherbakov** (deputy editor-in-chief),
U.A. Budzinsky, C.Ph.M.Sc. **A.V. Galdetsky**,
B.F. Gorbik, D.T.Sc. **A.D. Zakurdaev**, C.T.Sc. **N.P. Zubkov**,
D.T.Sc. **S.S. Zyrin**, C.T.Sc. **A.S. Kotov**, D.T.Sc. **P.V. Kupriyanov**,
C.T.Sc. **V.G. Lapin**, D.T.Sc. **M.I. Lopin**, D.T.Sc. **N.A. Lyabin**, **V.M. Malyschik**,
D.T.Sc., professor **P.P. Maltsev** (IMWF SE RASc), C.T.Sc. **P.M. Meleshkevich**,
D.T.Sc., professor **V.P. Meschanov** (JSC «TSNIIIA»),
C.T.Sc. **A.G. Mikhalchenkov**,
D.T.Sc. **S.P. Morev** (FSUE «RPC «Torij»), **O.A. Morozov** (JSC «RPC «Magratep»),
C.T.Sc. **V.U. Myakinkov**, D.Ph.M.Sc. **A.I. Panas**,
D.Ph.M.Sc. **A.B. Pashkovsky**, C.Ph.M.Sc. **S.A. Pleshanov**, **E.N. Pokrovsky**,
C.T.Sc. **O.V. Polivnikova**, C.T.Sc. **A.V. Potapov**, D.T.Sc., professor **R.A. Silin**,
D.T.Sc. **K.G. Simonov**, **V.P. Stebunov** (executive secretary),
D.T.Sc. **M.M. Trifonov** (JSC RPC «Istok-System»),
D.T.Sc., professor **N.D. Ursulyak**

The journal is registered by the Ministry on mass media of the Russian Federation (certificate ПИ № ФС 77-24651 date June 6, 2006).

By the Resolution of the Presidium of the Higher Attestation Commission of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation dated December 29, 2015 the scientific and technical collection «Elektronnaya Tekhnika», series 1 «SVCH-tekhnika» being published in JSC «RPC «Istok» named after Shokin» since 1950, has been reincluded into the «List of reviewed scientific publications in which the principal scientific results for candidate's thesis and doctoral thesis must be published».

© Joint Stock Company «Research and Production Corporation «Istok» named after A.I. Shokin»

СОДЕРЖАНИЕ

Технология и материаловедение

Налогин А.Г., Пашков А.Н., Горбатюк С.М. – Получение макетов композиционного материала SiC–Al методом горячего прессования..... 6

Лябин Н.А., Парамонов В.С., Парамонова Г.М., Клименко В.И., Колоколов И.С., Чурсин А.Д., Осотов О.В., Виноградов К.Ю., Бетина Л.Л., Лихачева И.Е., Трубачева Г.А. – Прецизионная микрообработка материалов ИЭТ на автоматизированных лазерных технологических установках «Каравелла»..... 12

Электровакуумные приборы

Вашин С.А., Корепин Г.Ф. – Компрессия по водороду в отпаянных ЭВП..... 22

Галдецкий А.В., Лопин М.И., Грицук Р.В., Рыжов В.А., Мишкин Т.А., Духина Н.Г., Закурдаев А.Д., Сапрынская Л.А. – Мощный электровакуумный усилитель метрового диапазона..... 29

Жабин Г.А. – Эмиссионные характеристики молекулярно-напыленных оксидных катодов в циклотронных защитных устройствах..... 49

Твердотельная электроника

Темнов А.М., Дудинов К.В., Емельянов А.М., Воронин А.А., Катков Д.А., Рогачев И.А., Мешков О.И. – Новое поколение мощных усилительных ГМИС *X*-диапазона на алмазной плате и нитридгаллиевых транзисторах..... 54

Далингер А.Г., Малыщик В.М., Иовдальский В.А. – Совершенствование структуры приёмопередающего модуля АФАР СВЧ-диапазона..... 75

Медицинская электроника

Казаринов К.Д., Тихонова Е.А., Солосин В.С. – Конструкция волноводного устройства для измерения параметров жидкостей..... 84

История

Попов Р.М. – Заграница нам поможет..... 89

Балыко И.А., Балыко А.К. – Плотность распределения частиц в полупроводнике в усвиях ударной ионизации..... 110

2(533).indd 4 23.06.2017 10:19:44

CONTENTS

Technology and material science

Nalogin A.G., Pashkov A.N., Gorbatyuk S.M. – Obtaining of SiC–Al composite materials by method of hot pressing..... 6

Lyabin N.A., Paramonov V.S., Paramonova G.M., Klimenko V.I., Kolokolov I.S., Chursin A.D., Osotov O.V., Vinogradov K.U., Betina L.L., Likhacheva I.E., Trubacheva G.A. – Precision microprocessing of electronic engineering products using automated laser technological installations «Karavella»..... 12

Electrovacuum devices

Vashin S.A., Korepin G.F. – Hydrogen compression in sealed-off vacuum devices..... 22

Galdetskiy A.V., Lopin M.I., Gritsuk R.V., Ryzhov V.A., Mishkin T.A., Dukhina N.G., Zakurdaev A.D., Saprynskaya L.A. – High-power electrovacuum amplifier of a meter range... 29

Zhabin G.A. – Emission characteristics of molecular sputter-deposited oxide cathodes operating in cyclotron protective devices..... 49

Solid-state electronics

Temnov A.M., Dudinov K.V., Yemelyanov A.M., Voronin A.A., Katkov D.A., Rogachev I.A., Meshkov O.I. – A new generation of *X*-band high-power amplifying HMICs on a diamond board and gallium nitride transistors..... 54

Dalinger A.G., Malyshchik V.M., Iovdalsky V.A. – Upgrading the structure of microwave active phased array transmitter-receiver module..... 75

Medical electronics

Kazarinov K.D., Tikhonova E.A., Solosin V.S. – Waveguide unit design for measuring liquid parameters..... 84

History

Popov R.M. – Abroad will help us..... 89

Balyko I.A., Balyko A.K. –The particles distribution density in semiconductor in shock ionization conditions..... 110

2(533).indd 5 23.06.2017 10:19:44

ТЕХНОЛОГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 669.018.95:621.396.67

ПОЛУЧЕНИЕ МАКЕТОВ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА SiC–Al МЕТОДОМ ГОРЯЧЕГО ПРЕССОВАНИЯ

А. Г. Налогин[1], А. Н. Пашков[1], С. М. Горбатюк[2]

[1]*АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино*

[2]*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва*

Проведен расчет с помощью программного комплекса QForm3D рабочего инструмента для процесса горячего прессования композиционного материала SiC–Al. Получены макеты теплоотводящих оснований и определен состав композиционного материала SiC–Al для максимального согласования с низкотемпературной, совместно обжигаемой керамикой.

КС: композиционный материал, горячее прессование, SiC–Al, пресс-форма, теплоотвод, расчет инструмента

OBTAINING SiC–Al COMPOSITE MATERIALS BY HOT PRESSING METHOD

A. G. Nalogin[1], A. N. Pashkov[1], S. M. Gorbatyuk[2]

[1]*JSC «RPC «Istok» named after Shokin», Fryazino*

[2]*National University of Science and Technology «MISiS», Moscow*

The operating tool for SiC–Al composite material hot pressing process has been calculated using QForm3D software. The models of heat removing bases were obtained and SiC–Al composite material composition for maximum matching with a low-temperature co-fired ceramics was determined.

Keywords: composite material, hot pressing, SiC–Al, press form, heat sink, tool calculation

1. ВВЕДЕНИЕ

В авиационной и космической отраслях, как известно, одну из важнейших ролей играют массогабаритные характеристики изделия, а одним из направлений развития является разработка материалов, сочетающих в себе необходимые конструкционные и эксплуатационные свойства

2(533).indd 6 23.06.2017 10:19:44

(прочность, теплопроводность, коррозионная стойкость) и при этом обладающих малым удельным весом. В частности, такая задача была решена после разработки технологии создания облегченных теплоотводящих оснований из композиционного материала SiC–Al для элементов конструкций приемопередающих субмодулей активной фазированной антенной решетки (АФАР). Таким образом, развитие СВЧ-электроники неразрывно связано с разработкой новых материалов, обладающих необходимыми заданными свойствами.

Цель исследования: получение макетных образцов композиционного материала SiC–Al методом горячего прессования.

Для достижения поставленной цели были решены следующие основные задачи:

- Выполнен расчет рабочего инструмента для горячего прессования с помощью программного комплекса QForm3D и изготовлена оснастка.
- Разработана и опробована технология производства металломатричных композитов с заданным комплексом свойств методом горячего прессования.
- Проведены рентгенофазовые исследования макетного образца.

Высоконаполненные композиционные материалы изготавливают методами порошковой металлургии, когда исходные компоненты на начальной стадии получения материала представляют собой комбинацию порошков. Эффективность порошковой металлургии обусловлена несколькими достоинствами. Одно из них заключается в снижении затрат энергии на производство изделий по сравнению с литейной технологией. Вторым важным достоинством является то, что способы порошковой металлургии позволяют использовать широкий спектр матричных порошков и армирующих наполнителей как по виду, так и по фракционному составу и различные варианты компактирования.

Система алюминий–карбид кремния является двухфазной. Одна фаза – металлическая матрица алюминиевого сплава (АК12ч), вторая – карбид кремния [1], имеющий преимущественно гексагональную кристаллическую решетку (6Н). В качестве матрицы композита был выбран алюминиевый сплав. Этот сплав имеет высокую теплопроводность (230 Вт/(м·К)), низкую плотность (2,7 г/см^3) и низкую стоимость. К его недостаткам необходимо отнести высокий ТКЛР – $23\cdot10^{-6}$ К$^{-1}$. ТКЛР – один из важнейших параметров разрабатываемого материала, поскольку он должен быть согласован с ТКЛР приборов ($(5\ldots8)\cdot10^{-6}$ К$^{-1}$), фиксируемых на теплоотводящие основания. Поэтому, выбирая наполнитель композита, необходимо брать материал с низким ТКЛР. В качестве наполнителя был использован SiC, ТКЛР которого составляет $4\cdot10^{-6}$ К$^{-1}$, а теплопроводность достигает 400 Вт/(м·К). Выбор SiC с решеткой 6Н обоснован его наибольшей теплопроводностью. При концентрации SiC в композите 63 % (объем.) материал согласован с низкотемпературной, совместно обжигаемой керамикой по ТКЛР и имеет теплопроводность 180 Вт/(м·К), плотность 3,0 г/см^3. Это в 3,3 раза меньше, чем у сплава медь–молибден [2].

Известно, что, при изменении концентрации SiC в алюминиевом сплаве, можно получить материалы с широким диапазоном эксплуатационных характеристик: ТКЛР – $(5\ldots11)\cdot10^{-6}$ К$^{-1}$, плотность – 2,7…3,2 г/см^3, теплопроводность – 140…200 Вт/(м·К). Сочетание таких свойств делает материал идеальным для теплоотводящих оснований электронных модулей АФАР, функционирующих при высоких уровнях мощности. Такой модуль включает в свой состав низкотемпературную, совместно обжигаемую керамику, которая должна быть согласована по ТКЛР ($(5{,}8\ldots7{,}20)\cdot10^{-6}$ К$^{-1}$) с теплоотводящим основанием.

2(533).indd 7 23.06.2017 10:19:44

2. ПОЛУЧЕНИЕ МАКЕТНЫХ ОБРАЗЦОВ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА SiC–Al МЕТОДОМ ГОРЯЧЕГО ПРЕССОВАНИЯ

Для получения макетных образцов в работе был выбран способ производства металломатричного композиционного материала, основанный на методе горячего прессования. Этот метод позволяет варьировать свойства композита изменением состава исходных компонентов шихты.

Необходимые параметры конечного материала (плотность, теплопроводность, ТКЛР, структура материала) обеспечивают режимы прессования. Разработана специальная оснастка для прессования и выбраны рациональные режимы процесса.

Изготовление алюмоматричного композиционного материала на основе системы SiC–Al предложено производить в следующей последовательности: взвешивание исходных компонентов, смешивание компонентов композита, введение пластификатора в пресс-порошок, формование заготовок, горячее прессование заготовок, спекание прессовок в регулируемой атмосфере, шлифовка спеченных заготовок композита, резка заготовок под размер, нанесение покрытия, контроль параметров материала.

Горячее прессование заготовок для образцов композиционного материала осуществлялось на гидравлическом прессе PYE-250 SIM. Материал пресс-формы должен обладать высоким сопротивлением термической усталости и выдерживать многократные нагревы и охлаждения без образования сетки трещин.

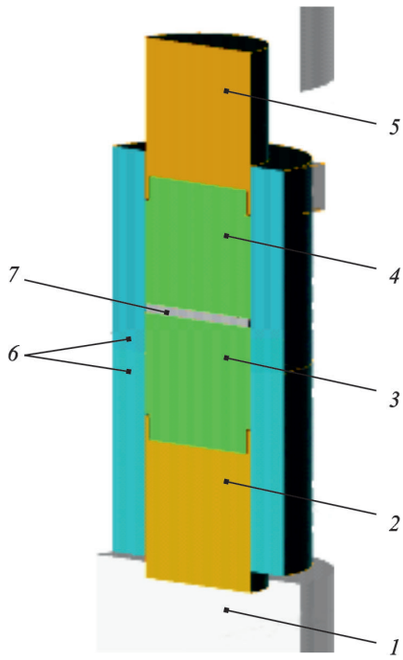


Рис. 1. Пресс-форма для прессования композита: *1*, *2*, *3* – части нижнего пуансона; *4*, *5* – части верхнего пуансона; *6* – матрица; *7* – заготовка из композита SiC–Al

Для прессования композита SiC–Al была спроектирована и изготовлена специальная пресс-форма. На рис. 1 приведена схема пресс-формы с заготовкой. Составные пуансоны позволяют снизить тепловые потери, уменьшают температуру внешних частей пуансона, которые находятся вне зоны нагрева. Параметры прессования варьировались в следующих пределах: температура прессования – 550, 600, 625 °С; давление прессования – 5…5 МПа; время прессования – 5…20 мин.

В работе проведен расчет рабочего инструмента оснастки для горячего прессования по фактическим напряжениям в программном обеспечении QForm [3]. Условия расчета следующие: скорость прессования составляет 1 мм/с на гидравлическом прессе при максимальном усилии 0,25 МН и температуре 600 °С. Проведен расчет напряжений и деформаций, возникающих в инструменте, изготовленном из стали 4Х5МФС, в процессе горячего прессования. Максимальные напряжения в рабочем инструменте составляют 130 МПа, а максимальные деформации – 0,00023 мм (рис. 2 и 3). Расчет показал, что в заданных режимах прессования инструмент работает в пределах упругих деформаций.

Анализ результатов расчета разработанной оснастки для прессования показал возможность ее использования в заданных условиях.

На рис. 4 приведено изменение плотности композита от

2(533).indd 8 23.06.2017 10:19:44

времени изотермической выдержки, а на рис. 5 – от давления прессования. Рациональное время изотермической выдержки составляет до 10 мин, что является достаточным условием для протекания процесса уплотнения. Зависимость плотности от давления прессования близка к линейной, максимальная плотность достигается при давлении 25 МПа (максимальное давление пресса). При температуре прессования 550 °С, времени прессования 15 мин и давлении 25 МПа плотность заготовок композита недостаточная и композит имеет пористую структуру. При 625 °С происходит выжимание алюминия из заготовки композита, заготовка разрушается. Наиболее рациональной является температура 600 °С. При данной температуре плотность заготовки композита составляет 2,8…2,9 г/см^3.

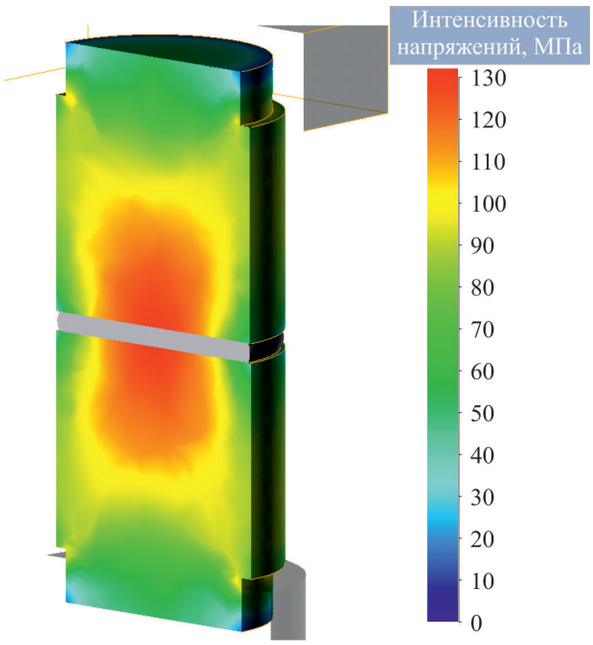


Рис. 2. Профиль распределения напряжений в рабочем инструменте пресс-формы

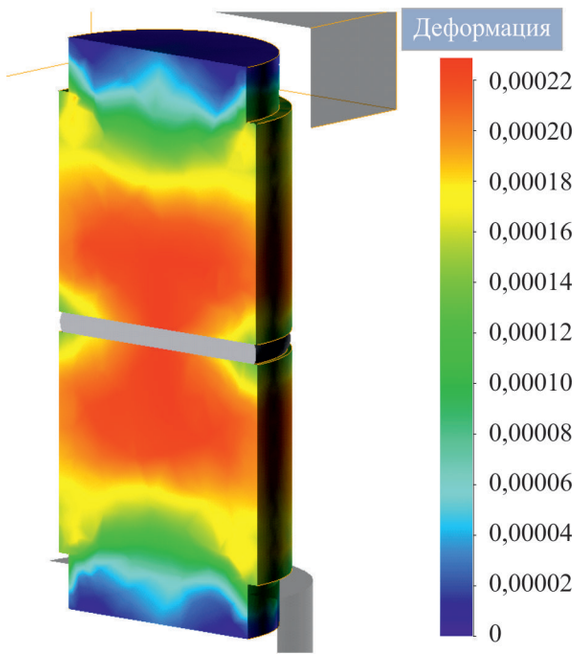


Рис. 3. Профиль распределения деформаций в рабочем инструменте пресс-формы

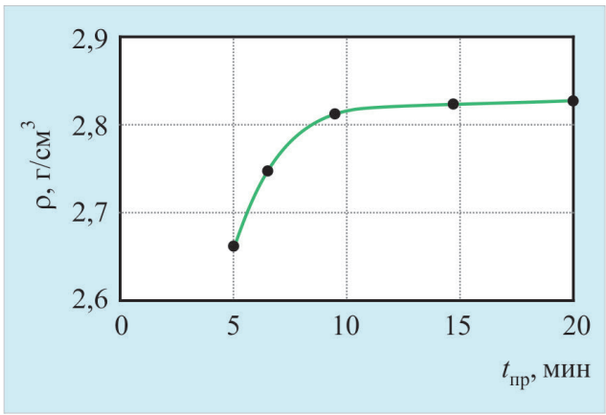


Рис. 4. Изменение плотности композита SiC–Al от времени изотермической выдержки при горячем прессовании ($T_{пр}$ = 600 °С, P = 20 МПа)

2(533).indd 9 23.06.2017 10:19:45

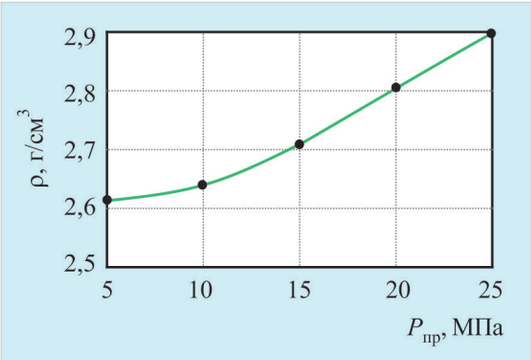


Рис. 5. Изменение плотности композита SiC–Al от давления прессования ($T_{пр}$ = 600 °С, t = 10 мин)

После прессования алюминиевая матрица имела зернистую структуру. Большинство композиционных материалов – представители термодинамически неравновесных систем, для которых характерно наличие развитой сети внутренних границ раздела и градиентов химических потенциалов элементов в матрице и армирующих элементах. Эти градиенты являются движущей силой процессов межфазного взаимодействия, в частности взаимной диффузии и химических реакций. Поэтому для улучшения структуры алюминиевого сплава его необходимо спекать. При спекании матричный алюминиевый сплав более плотно обтекает зерна наполнителя, что улучшает межфазное взаимодействие.

В ходе исследований установлены рациональные технологические параметры процесса спекания: температура спекания – 700 °С, время выдержки – 1 ч, атмосфера – азот. Данная температура позволяет исключить взаимную диффузию и химическое взаимодействие между фазами [4].

Проведение количественного фазового анализа образцов композитов SiC–Al осуществлялось на рентгеновском дифрактометре ДРОН-8. Рентгеновские дифрактограммы фиксировались в трех разных точках образца. Следует отметить, что рентгеновские дифрактограммы в разных точках образца практически не отличались.

На рис. 6 приведена характерная рентгеновская дифрактограмма макетного образца из композита SiC–Al. Согласно данным дифрактограммы, в образце наблюдаются фазы SiC, Al и Si.

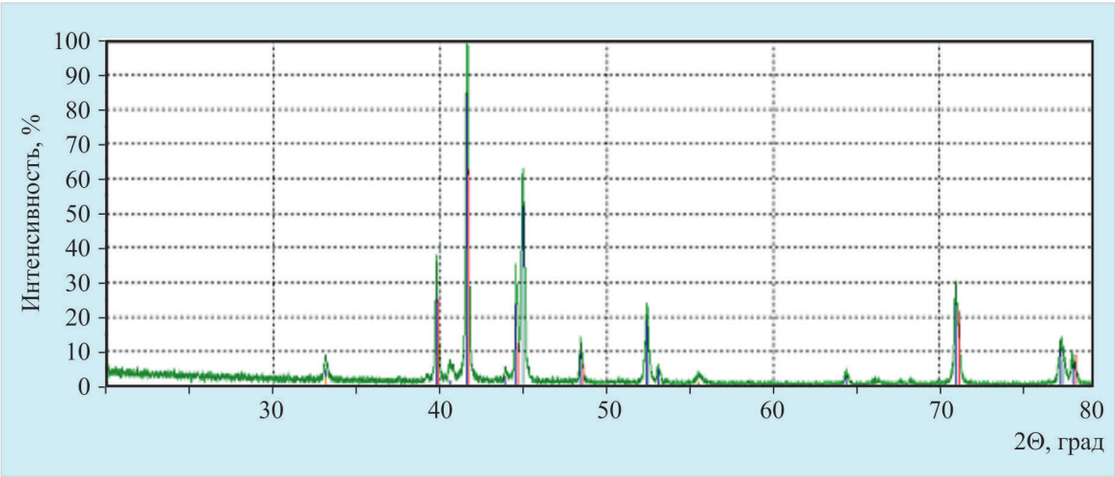


Рис. 6. Характерная рентгеновская дифрактограмма макетного образца из композита SiC–Al

Результаты количественного анализа макетного образца из композита SiC–Al представлены в таблице.

2(533).indd 10 23.06.2017 10:19:45

Результаты рентгенофазового анализа макетного образца из композита SiC–Al

Удельный вес, %	Химическая формула	Название	D_x	Сингония
62,88	SiC	Moissanite-6H, syn	3,239	Hexagonal
34,37	Al	Aluminum, syn	2,699	Cubic
2,74	Si	Silicon	2,329	Cubic

На основе проведенных исследований производства макетных образцов из композита SiC–Al был выбран рациональный фракционный состав заготовок (SiC – 50 мкм и 5 мкм) с соответствующей кристаллической сингонией, согласованный с низкотемпературной, совместно обжигаемой керамикой. Гексагональная кристаллическая структура 6H карбида кремния позволяет получить максимальную теплопроводность в конечном материале.

3. ВЫВОДЫ

1. Разработана технология производства макетов из композиционных материалов методом горячего прессования (давление – до 25 МПа при $T = 0{,}9T_{пл}$, изотермическая выдержка – до 10 мин). Технология позволяет получить композиционные материалы на основе матрицы из меди, алюминия и его сплавов необходимых, заданных составов с содержанием наполнителя до 70 %.

2. С помощью программного комплекса QForm3D разработана и исследована модель рабочего инструмента оснастки для горячего прессования металломатричных композиционных материалов, на основе расчетов определены фактические напряжения и деформации рабочего инструмента. Показано, что при заданных режимах прессования инструмент работает в пределах упругих деформаций (максимальные напряжения – 130 МПа, максимальные деформации – 0,00023 мм), что обеспечивает его высокую работоспособность.

ЛИТЕРАТУРА

1. CPS Technologies: Metal Matrix Composites [Электронный ресурс]. - http://www.alsic.com/quick-definitions (дата обращения: 15.12.2016).

2. **Occhioner, M. A.** Aluminum silicon carbide (AlSiC). Thermal management packaging for high density packaging applications / M. A. Occhioner, R. A. Hay, R. W. Adams, K. P. Fennessy // Proceedings of SPIE. – 1999. – P. 1 – 6.

3. QForm: моделирование процессов обработки металлов давлением [Электронный ресурс]. – http://www.qform3d.ru/products/qfv8 (дата обращения: 15.12.2016).

4. **Чернышова, Т. А.** Разработка и апробация композиционных материалов систем Al–SiC и Al–TiC в узлах трения нефтедобывающего оборудования / Т. А. Чернышова, Р. С. Михеев, И. Е. Калашников, И. В. Акимов, Е. И. Харламов // Физика и химия обработки материалов. – 2010. – № 5. – С. 79.

Статья поступила 12 января 2017 г.

2(533).indd 11 23.06.2017 10:19:46

УДК 621.378.325

ПРЕЦИЗИОННАЯ МИКРООБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ ИЭТ НА АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ «КАРАВЕЛЛА»

Н. А. Лябин, В. С. Парамонов, Г. М. Парамонова, В. И. Клименко, И. С. Колоколов, А. Д. Чурсин, О. В. Осотов, К. Ю. Виноградов, Л. Л. Бетина, И. Е. Лихачева, Г. А. Трубачева

АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино

Представлены результаты исследований по прецизионной микрообработке фольговых и тонколистовых материалов на лазерном технологическом оборудовании типа «Каравелла». Проведены расчеты пороговых плотностей пиковой и средней мощностей излучения для испарения теплопроводных, тугоплавких и других материалов. Экспериментально установлено, что для качественной микрообработки плотность мощности в обрабатывающем световом пятне должна превышать пороговые значения на 1…2 порядка; исследованы зависимости времени и скорости обработки от толщины материала. Разработаны технологии химической очистки металлических деталей ИЭТ после лазерной обработки от шлака и грата.

КС: прецизионная микрообработка, лазерное технологическое оборудование, лазеры и лазерные системы на парах меди, технологии химической очистки

PRECISION MICROPROCESSING OF ELECTRONIC ENGINEERING PRODUCTS USING AUTOMATED LASER TECHNOLOGICAL INSTALLATIONS «KARAVELLA»

N. A. Lyabin, V. S. Paramonov, G. M. Paramonova, V. I. Klimenko, I. S. Kolokolov, A. D. Chursin, O. V. Osotov, K. U. Vinogradov, L. L. Betina, I. E. Likhacheva, G. A. Trubacheva

JSC «RPC «Istok» named after Shokin», Fryazino

The results of investigations on precision microprocessing of foil and thin sheet materials using laser technological equipment «Karavella» have been presented. The calculations of threshold density for peak and average radiation power for evaporating heat-conductive, refractory and other materials were carried out. It was proved experimentally that for qualitative microprocessing the power density in the processed light spot should not exceed the threshold values by 1…2 orders; the dependencies of time and processing rate versus material thickness were studied. The technologies of chemical cleaning of electronic engineering products metal parts after laser processing from slags and burrs have been developed.

Keywords: precision microprocessing, laser technological equipment, lasers and laser systems on copper vapor, chemical cleaning technologies

1. ВВЕДЕНИЕ

За период 2001 – 2013 гг. была разработана серия современных автоматизированных лазерных технологических установок (АЛТУ) типа «Каравелла» на основе импульсных промышленных

2(533).indd 12 23.06.2017 10:19:46

лазеров и лазерных систем на парах меди (ЛПМ и ЛСПМ) с высоким качеством излучения и прецизионных трехкоординатных столов *XYZ* с точностью позиционирования по осям ±3 мкм: «Каравелла-1» с ЛСПМ «Кулон-10» мощностью излучения 10…15 Вт и «Каравелла-1М» с ЛСПМ «Кулон-20» мощностью 20…25 Вт и рабочим полем *XY*-стола 150×150 мм; «Каравелла-2» и «Каравелла-2М» с ЛПМ «Кулон-06» мощностью 6…8 Вт и рабочим полем *XY*-стола 100×100 мм и 200×200 мм, в которых обрабатывающим инструментом является сфокусированное световое пятно диаметром 10…20 мкм и плотностью пиковой мощности 10^9…10^{11} Вт/см^2. АЛТУ «Каравелла-1» предназначена для производительной и качественной прецизионной микрообработки тонколистовых металлических материалов и большого круга полупроводников и диэлектриков толщиной 0,1…0,5 мм; «Каравелла-1М» – для тех же материалов толщиной 0,5…1 мм; «Каравелла-2» и «Каравелла-2М» – для фольговых материалов толщиной 0,01…0,3 мм для ИЭТ [1–4]. Параллельно с созданием современных АЛТУ «Каравелла» разрабатывались лазерные технологии по изготовлению прецизионных деталей с высоким качеством: шероховатостью поверхности реза не более 1…2 мкм и зоной термического воздействия не более 5…10 мкм – для приборов СВЧ-техники и других ИЭТ.

2. ПОРОГОВЫЕ ПЛОТНОСТИ ПИКОВОЙ И СРЕДНЕЙ МОЩНОСТЕЙ ИМПУЛЬСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЛПМ ДЛЯ ИСПАРЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНЫХ И ТУГОПЛАВКИХ МАТЕРИАЛОВ, КРЕМНИЯ И ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО АЛМАЗА

Знание пороговой плотности пиковой мощности лазерного излучения для испарения материалов является начальным условием при создании и определении выходных энергетических параметров технологического оборудования.

Значения пороговой пиковой плотности и соответствующей ей минимальной средней мощности для испарения материалов определялись расчетным путем по формулам (1) и (2):

$$q_и = \frac{kT_и}{2A}\sqrt{\frac{\pi}{\delta\tau}}, \tag{1}$$

где k – коэффициент теплопроводности; $T_и$ – температура испарения (кипения); $A = 1 - R$ – коэффициент поглощения; R – коэффициент отражения; δ – коэффициент температуропроводности; τ – длительность импульса лазерного излучения [5–7];

$$P_{ср} = q_и \cdot f \cdot \tau \cdot S, \tag{2}$$

где f – частота повторения импульсов; $S = \pi d^2/4$ – площадь светового пятна сфокусированного лазерного пучка; d – диаметр светового пятна.

Длительность импульсов излучения ЛПМ и ЛСПМ, применяемых в АЛТУ «Каравелла», составляет 10^{-8} с, частота повторения импульсов – 14…15 кГц. В качестве силового элемента применяются ахроматические объективы с фокусным расстоянием F = 100, 150 и 200 мм, с помощью которых излучение фокусируется в обрабатывающее световое пятно диаметром 10…20 мкм. Теплофизические и оптические параметры, расчетные плотности пиковой и средней мощностей излучения ЛПМ для испарения ряда теплопроводных, тугоплавких и других материалов ИЭТ представлены в табл. 1.

Например, для серебра и золота с пороговой плотностью пиковой мощности испарения

2(533).indd 13 23.06.2017 10:19:46

$1{,}6 \cdot 10^9$ и $0{,}5 \cdot 10^9$ Вт/см^2 при диаметре светового пятна 10 мкм минимальные значения средней мощности излучения составляют соответственно 0,19 и 0,06 Вт (см. табл. 1).

Таблица 1

Основные теплофизические и оптические параметры, пороговые плотности пиковой и средней мощностей излучения ЛПМ для испарения широко используемых материалов ИЭТ

Материал	Температура испарения (кипения) $T_и$, К	Коэффициент поглощения A	Коэффициент теплопроводности k, Вт/(м·К)	Коэффициент температуро-проводности δ, см^2/с	Пороговая плотность мощности $q_и \cdot 10^9$, Вт/см^2	Пороговая средняя мощность ЛПМ $P_{ср}$, мВт	
						d = 10 мкм	d = 20 мкм
Теплопроводные материалы							
Cu	2840	0,368	401	1,17	0,25	30	120
Au	3080	0,15	317	1,28	0,5	60	240
Al	2792	0,086	236	0,938	0,7	80	320
Ag	2485	0,045	429,5	1,74	1,6	190	750
Тугоплавкие материалы							
Ta	5731	0,59	55,2	0,237	0,1	12	36
Mo	4885	0,41	140	0,54	0,21	24	96
W	5828	0,484	162,8	0,64	0,22	26	104
Нержавеющая сталь							
Сталь	3000	0,5	32	0,035	0,09	11	43
Никель							
Ni	3005	0,384	90,4	0,229	0,13	15	60
Кремний и искусственный поликристаллический алмаз							
Si	3543	0,5	150	1,48	0,08	9	36
Алмаз	4273	0,15	1600	7	1,5	180	720

Экспериментальные исследования по микрообработке фольговых металлических материалов на АЛТУ «Каравелла» показали, что при пороговых уровнях мощности процесс резки металла сопровождается образованием вдоль лазерного реза застывшего расплава металла. Но при увеличении плотности пиковой мощности на порядок и выше, что соответствует средней мощности излучения ЛПМ не менее 1 Вт, отверстия в фольговых материалах становятся чистыми, с субмикронной шероховатостью. Когда толщина фольги сопоставима с шириной лазерного реза (10…50 мкм), разлетающиеся в результате микровзрыва из зоны воздействия излучения пары и капли металла практически не встречают преград и полностью удаляются из этой зоны.

3. ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ МАТЕРИАЛА НА СКОРОСТЬ И КАЧЕСТВО ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

При резке импульсным излучением ЛПМ материалов толщиной более 50 мкм образовавшиеся стенки разреза начинают препятствовать прямому разлету паров, что, в свою очередь, приводит к образованию жидкой массы. Под давлением паров жидкий металл из зоны воздействия

2(533).indd 14 23.06.2017 10:19:46

растекается. Этот эффект проявляется тем сильнее, чем больше толщина материала превосходит размер обрабатывающего (сфокусированного) пятна. Основные причины увеличения количества жидкой фазы следующие:

− уменьшение плотности светового потока из-за постепенной расфокусировки луча с ростом глубины обработки;

− относительно медленный спад мощности в конце импульса излучения;

− увеличение длительности импульса излучения.

Установлено, что уже при толщине материала 200 мкм, даже при увеличении средней мощности излучения ЛПМ до 20 Вт, полного удаления вещества за один проход не происходит. Также отмечено, что с увеличением мощности ширина реза увеличивается за счет того, что при этом в испарении уже участвуют боковые «крылья» фокального пятна. При больших уровнях мощности разрезать материал можно и за один проход, но при этом шероховатость может быть слишком большой и не отличаюшейся от шероховатости при обработке твердотельным или CO_2-лазером. Поэтому для обеспечения высокого качества резки требуется неоднократное прохождение лазерного луча. Многопроходная резка несколько снижает скорость обработки, но она необходима для минимизации зоны термического влияния и шероховатости поверхности реза.

Экспериментальные исследования по выяснению влияния толщины материала на время, скорость и качество обработки были проведены на подложках из меди, молибдена, алюминия, вольфрама и ряда неметаллических материалов с ахроматическими объективами с F = 110 и 230 мм, когда диаметр рабочего светового пятна составлял 15 и 25 мкм. Средняя мощность излучения была равна 20 Вт, частота повторения импульсов − 8 кГц и длительности импульсов по полувысоте – 15 нс. Время и скорость обработки для меди, молибдена и вольфрама оказались одинаковыми, что объясняется практически одинаковыми значениями пороговой плотности пиковой мощности испарения для этих материалов (см. табл. 1).

На рис. 1 показаны зависимости времени и скорости сверления от толщины материала для меди и молибдена, широко применяемых в производстве ИЭТ, методом прямой прошивки с использованием ахроматического объектива с F = 110 мм (d = 15 мкм). Плотность пиковой мощности ρ с таким световым пятном составляла 10^{11} Вт/см^2, что на два порядка больше пороговой плотности мощности. При этом кривые для этих материалов практически совпали.

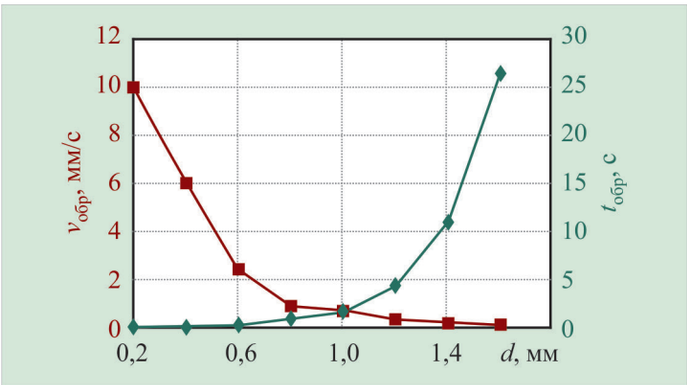


Рис. 1. Зависимости времени $t_{обр}$ и скорости $v_{обр}$ обработки для меди (молибдена) от толщины материала d при сверлении отверстий импульсным излучением ЛПМ с диаметром сфокусированного пятна 15 мкм ($P_{ср}$ = 20 Вт, f = 8 кГц, τ = 15 нс и ρ = 10^{11} Вт/см^2)

2(533).indd 15 23.06.2017 10:19:46

Из хода кривых однозначно следует, что при толщинах металла более 1 мм время сверления резко возрастает, а скорость соответственно снижается, и оказывается, что импульсное излучение ЛПМ выгодно использовать при обработке толщин менее 1 мм. И еще более выгодно применять ЛПМ при микрообработке металлических материалов толщиной менее 0,6 мм, когда время обработки составляет доли секунды, а скорость – единицы и десятки миллиметров в секунду, что на порядок больше по сравнению с традиционными способами обработки, включая и ЭЭО.

Для удаления разлетающихся из зоны обработки парообразных веществ в технологической камере АЛТУ «Каравелла» предусмотрена система вытяжного отсоса. Но в процессе обработки имеет место образование шлака в виде разных химических соединений и грата в виде сконденсированных капель. Поэтому остро встал вопрос о разработке способов очистки зоны лазерной обработки от загрязнений.

4. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ХИМИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПРЕЦИЗИОННЫХ ДЕТАЛЕЙ ОТ ШЛАКА И ГРАТА ПОСЛЕ ЛАЗЕРНОЙ МИКРООБРАБОТКИ

Микрообработку металлических материалов излучением ЛПМ обычно производят в атмосфере воздуха, т. к. в обрабатывающем световом пятне диаметром 10…20 мкм плотность пиковой мощности достигает очень высоких значений − 10^9…10^{11} Вт/см^2. При этом процесс лазерной обработки идёт при высокой температуре (около 10000 °С) в испарительном режиме и сопровождается образованием небольшого количества жидкой массы. Вследствие чего происходит образование в зоне реза шлака и грата. Отработка технологии очистки от загрязнений производилась на реальных прецизионных деталях, изготавливаемых на технологических установках АЛТУ «Каравелла». Исследования проводились на материалах, широко применяемых в ИЭТ: меди и молибдене. После лазерной обработки проводились эксперименты по отжигу деталей в восстановительной водородной и вакуумной печах и в атмосфере воздуха при разных температурных режимах, но положительных результатов по очистке не было достигнуто. Следующим этапом стало применение ультразвуковой ванны типа УЗВ-1,3 л с рабочей частотой 35 кГц и деионизованной водой с подогревом. Детали подвергались ультразвуковой обработке сразу же после окончания лазерной микрообработки. Эффективность ультразвукового воздействия оказалась достаточно высокой: удалялась большая часть грата и шлака, но оставались мелкий прилипший грат и тонкий слой нагара. Для удаления последних специалистами химического отдела НПП «Исток» были разработаны новые химические методы очистки.

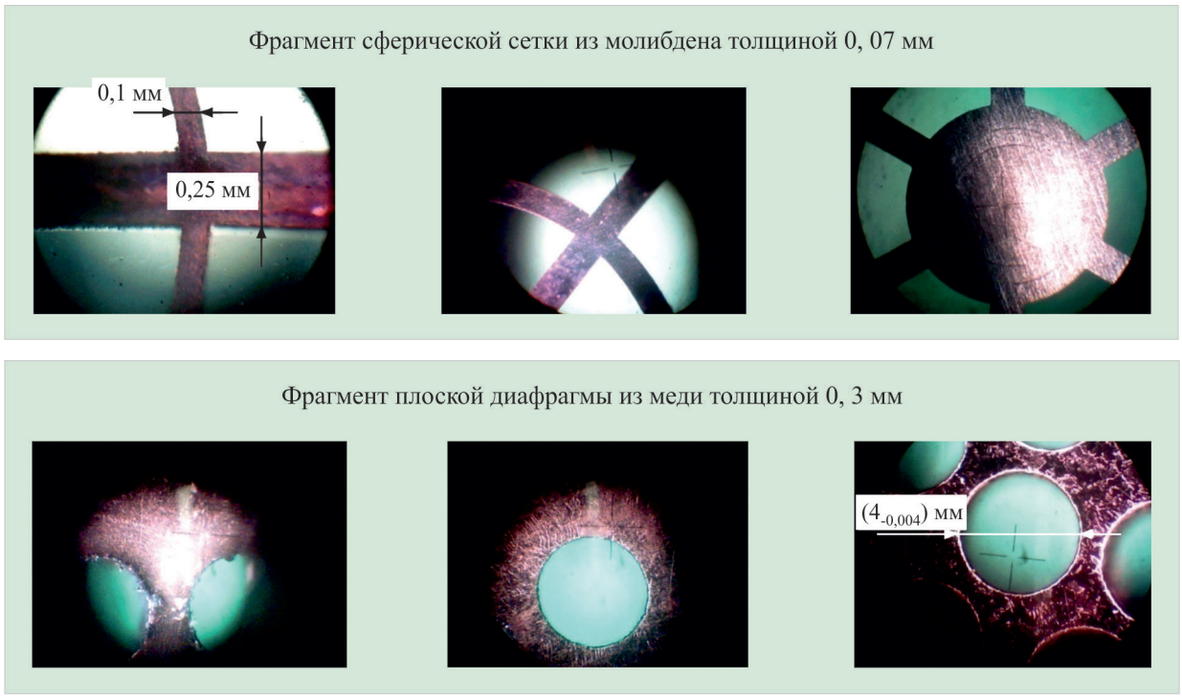
Полностью были отработаны режимы химической очистки для таких электровакуумных металлов, как медь, серебро, молибден, вольфрам, тантал, титан, никель, ковар, псевдосплавы типа МД, и для других металлов, сплавов и припоев. На рис. 2 представлены увеличенные фрагменты деталей из молибдена и меди на каждом этапе обработки.

Технология химической очистки медных деталей

Требования к очищенным деталям включают, кроме удаления нагара с меди в местах воздействия лазерного излучения, также сохранение структуры поверхности меди и размеров прорезанных в ней отверстий. Очистка медных диафрагм после лазерной резки в режимах, используемых для снятия с таких диафрагм нагара после электроискровой обработки, к успеху не привела – нагар с мест реза полностью не снялся. Нагар с мест реза хорошо снимается,

2(533).indd 16 23.06.2017 10:19:47

если в маршрут очистки ввести операцию травления диафрагм в растворе соляной кислоты с наложением ультразвукового поля. Однако в этом случае поверхность меди растравливается. Оптимальное решение было получено при использовании маршрута очистки, приведенного в табл. 2. После такой обработки места реза чистые, состояние поверхности диафрагм не отличается от исходного, а размеры отверстий в диафрагмах точно соответствуют чертежу.



а) *б*) *в*)

Рис. 2. Этапы технологии изготовления прецизионных деталей при лазерной обработке: *а* – лазерная обработка; *б* – УЗ-обработка; *в* – химическая очистка

Таблица 2

Очистка диафрагм из меди

Режим очистки после электроискровой обработки	Режим очистки после лазерной резки
1. Обезжиривание в трихлорэтилене	1. Обезжиривание в трихлорэтилене
2. Обработка в растворе щелочи	2. Обработка в растворе щелочи
3. Декапирование в растворе соляной кислоты	3. Обработка в водном растворе для полирования меди
4. Отжиг в водороде	4. Обработка в воде при ультразвуковом поле частотой 35 кГц

Диафрагмы изготавливались не только из чистой меди, но и из медного сплава марки МАГ. Очистка диафрагм из сплава МАГ по режиму, приведенному в табл. 2, показала, что поверх-

2(533).indd 17 23.06.2017 10:19:47

ность меди значительно растравлена. Вероятно, это происходит в результате вытравливания алюминия, присутствующего в сплаве МАГ. Доработка режимов для очистки таких диафрагм будет проведена.

Технология химической очистки молибденовых деталей

Теневые и управляющие сетки из молибдена можно разделить на два типа: первый – сетки после очистки покрываются антиэмиттером и шероховатость их поверхности не обязательно должна быть минимальной (шероховатость улучшает адгезию антиэмиттера); второй – сетки с полированной поверхностью.

Для сеток, к которым не предъявляются требования по минимальной шероховатости, был разработан режим очистки с использованием травильного раствора с перекисью водорода (табл. 3). Эта технология обеспечивает полное удаление нагара с мест реза и сохранение размеров сетки.

Таблица 3

Очистка сеток из молибдена

Технология обработки	Результат
I. Требования к сохранению исходного состояния поверхности отсутствуют	
Обезжиривание в трихлорэтилене Обработка в растворе щелочи Травление в растворе на основе перекиси водорода Обработка в воде при ультразвуковом поле частотой 35 кГц	Нагар в местах реза полностью удален
II. Необходимо сохранить исходную чистоту поверхности	
1. Обезжиривание в трихлорэтилене Обработка в растворе щелочи Электрополирование. $Д_к$ = 50 А/дм^2 Обработка в воде при ультразвуковом поле частотой 35 кГц	Нагар удален. Поверхность растравлена
2. То же, электрополирование при $Д_к$ = 100...200 А/дм^2	Нагар удален. Поверхность полированная. Имеются отдельные точки раствора
3. Обезжиривание в трихлорэтилене Нанесение лака Лазерная резка Электрополирование. $Д_к$ = 100...200 А/дм^2 Обработка в воде при ультразвуковом поле частотой 35 кГц Снятие лака	Нагар удален. Исходная полировка не нарушена

Указанную выше технологию нельзя использовать для очистки сеток с полированной поверхностью, поскольку качество поверхности при такой обработке не сохраняется. По этой причине для сеток с полированной поверхностью была использована другая технология обработки, с применением операции электрополировки (табл. 3, режим II-1). Обработка по

2(533).indd 18 23.06.2017 10:19:47

такой технологии сеток из полированного австрийского молибдена показала, что нагар с мест реза снимается, но на поверхности сетки появляются матовые участки, а также точки-растравы.

Сохранить исходную полировку австрийского молибдена удалось при использовании большой плотности тока при электрополировке – 100…200 А/дм^2 (табл. 3, режим II-2). Однако при этом избавиться полностью от точек-растравов не удается. Необходимо отметить, что качество поверхности отечественного молибдена при электрополировке в таких режимах существенно повышается: исчезают риски проката, поверхность становится блестящей, но точки-растравы также появляются.

В связи с тем что сохранить полностью исходное состояние полированного австрийского молибдена не удается, была опробована технология очистки с использованием пленки химически стойкого лака для защиты молибдена от воздействия агрессивных сред (табл. 3, режим II-3). Лак наносился на заготовки из полированного молибдена до операции резки. Операция разрыхления продуктов нагара в расплаве щелочи была исключена, поскольку лак в щелочи не устойчив. Однако, как показали эксперименты, высокая плотность тока при полировке («шоковый» режим) и последующая ультразвуковая обработка в воде при частоте 35 кГц позволяют снять нагар с мест лазерной резки. После снятия лака поверхность молибдена чистая, матовых участков или точек-растравов не наблюдается.

Поскольку плотность тока при электрополировке довольно высока, то необходимо обеспечить хороший контакт полируемой детали и электродов установки полирования во избежание колебаний тока. Для этого были сделаны специальные оправки, обеспечивающие жесткий контакт детали и электродов.

Технология химической очистки изделий из титана и других материалов

Оптимизация режимов финишной очистки изделий из титана после лазерной микрообработки проводилась по следующим направлениям:

– выбор условий разрыхления и обработки нагара и шлака, образующихся при лазерной резке;

– выбор состава раствора для стравливания продуктов реза после их разрыхления.

Необходимо отметить, что, кроме удаления продуктов разрушения при лазерной резке, разрабатываемая технология финишной очистки изделий из различных материалов должна обеспечивать сохранение структуры поверхности материала и размеров, согласно требованиям чертежа. Выбор раствора для стравливания продуктов лазерной обработки должен определяться при отработке технологии финишной очистки конкретных деталей.

Вначале разрыхление шлака и нагара проводили способом выдерживания изделия в кипящем водном растворе щелочи (NaOH). Для стравливания продуктов были использованы два раствора:

– № 1 – водный раствор азотной кислоты с фтористым калием. Толщина стравливания в таком растворе может быть от 3 до 10 мкм;

– № 2 – раствор перекиси водорода с аммиаком. Толщина стравливания – менее 1 мкм.

Однако даже после повторения операций разрыхления и травления удалить полностью продукты реза не удавалось. Поэтому был опробован более жесткий способ – обработка (выдержка) в расплаве щелочи. Этот способ разрыхления дал положительный результат – после стравливания в растворах № 1 и 2 и дополнительной промывки в деионизованной воде с ультразвуком (35 кГц) была получена чистая поверхность, без следов нагара в отверстиях.

2(533).indd 19 23.06.2017 10:19:47

По результатам экспериментов отработан следующий маршрут очистки титана:

1. Контроль внешнего вида (микроскопом).
2. Выдержка в расплаве щелочи.
3. Промывка в горячей проточной воде.
4. Травление в растворах № 1 и 2.
5. Промывка в проточной холодной воде.
6. Промывка в деионизованной воде с ультразвуком.
7. Сушка.
8. Контроль внешнего вида (с помощью микроскопа).

Кроме представленных здесь трех технологий, были разработаны технологии химической очистки и для других широко применяемых как теплопроводных (Al, припои на основе Au и Ag), так и тугоплавких (W, Ta) металлов, их сплавов и ряда других материалов.

5. ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Проведен расчет пороговой плотности пиковой мощности испарения для теплопроводных и тугоплавких металлов и других материалов и соответствующей им средней мощности излучения ЛПМ. Расчеты показали, что пороговая плотность мощности для металлов находится в диапазоне $10^8 \ldots 10^9$ Вт/см^2, а соответствующая им средняя мощность ЛПМ при фокусировке излучения в пятно диаметром 10…20 мкм составляет доли ватта (0,012…0,75 Вт).

2. Экспериментальные исследования по микрообработке импульсным наносекундным излучением ЛПМ показали, что для обеспечения высокого качества реза необходимо иметь в обрабатывающем (сфокусированном) световом пятне плотность пиковой мощности на один-два порядка выше пороговой плотности – $10^{10} \ldots 10^{11}$ Вт/см^2, когда процесс обработки идет в испарительном режиме (с минимумом жидкой фазы).

3. С увеличением толщины металла время лазерной обработки возрастает, а скорость снижается. Показано, что импульсным излучением ЛПМ наиболее эффективно обрабатывать материалы толщиной до 0,6 мм, когда время обработки составляет доли секунды, а скорость – единицы и десятки миллиметров в секунду, что на порядок больше по сравнению с ЭЭО.

4. Разработаны технологии химической очистки с наложением ультразвукового поля от шлака и грата после лазерной микрообработки теплопроводных (Cu, Al, припоев на основе Au, Ag) и тугоплавких (Mo, W, Ta) металлов, их сплавов и ряда других материалов, широко применяемых в ИЭТ.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Лябин, Н. А.** Импульсные лазеры на парах меди, технологическое и медицинское оборудование на их основе / Н. А. Лябин, А. Н. Королев, Е. Н. Покровский, В. Н. Батыгин, П. С. Мелешкевич, А. Д. Чурсин, В. И. Клименко, В. С. Парамонов, Е. А. Котюргин, И. С. Колоколов, Г. М. Парамонова, Л. Л. Бетина, М. Е. Королева, И. В. Каморин // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2013. – Вып. 3 (518). – С. 211 – 220.

2. **Лябин, Н. А.** Современные промышленные автоматизированные лазерные установки «Каравелла-1» и «Каравелла-1М» для прецизионной микрообработки материалов изделий электронной техники / Н. А. Лябин, А. Г. Григорьянц, М. А. Казарян // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2014. – № 9. – С. 19 – 26.

3. **Лябин, Н. А.** Современные промышленные автоматизированные лазерные технологические установки «Каравелла-2» и «Каравелла-2М» для прецизионной микрообработки тонколистовых материалов ИЭТ / Н. А. Лябин, А. Д. Чурсин, В. И. Клименко, В. С. Парамонов, И. С. Колоколов, Г. М. Парамонова, Л. Л. Бетина,

2(533).indd 20 23.06.2017 10:19:47

М. Е. Королева, А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, М. А. Казарян // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2014. – № 10. – С. 41 – 48.

4. **Лябин, Н. А.** Применение технологии прецизионной лазерной микрообработки при макетировании и производстве многослойных керамических плат LTCC для изделий СВЧ-электроники / Н. А. Лябин, Л. В. Ляпин, С. С. Семенюк // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2014. – Вып. 3 (536). – С. 211 – 220.

5. **Либенсон, М. Н.** Взаимодействие лазерного излучения с веществом (силовая оптика): конспект лекций. Часть I. Поглощение лазерного излучения в веществе / М. Н. Либенсон, Е. Б. Яковлев, Г. Д. Шандыбина; под общей ред. В. П. Вейко – СПб: СПб ГУ ИТМО, 2008. – 141 с.

6. **Вейко, В. П.** Опорный конспект лекций по курсу «Физико-технические основы лазерных технологий». Раздел: Технологические лазеры и лазерное излучение / В. П. Вейко. – СПб: СПб ГУ ИТМО, 2007. – 52 с.

7. **Вейко, В. П.** Опорный конспект лекций «Лазерные микро- и нанотехнологии в микроэлектронике» / В. П. Вейко. – СПб: СПб ГУ ИТМО, 2012. – 141 с.

Статья поступила 16 февраля 2017 г.

НОВЫЕ КНИГИ

Сверхширокополосные лампы бегущей волны. Исследования в СВЧ-, КВЧ- и ТГЧ-диапазонах. Внедрение в производство. Монография / Под ред. Н. А. Бушуева. – М.: Радиотехника, 2015. – 480 с.: ил. Науч. серия «Радиоэлектронная борьба».

Представлены результаты исследований, разработок и внедрения в производство сверхширокополосных ЛБВ. Рассмотрены конструкции и технология их изготовления для СВЧ-, КВЧ- и ТГЧ-диапазонов. Исследованы способы улучшения технических характеристик ЛБВ, а также вопросы построения усилителей на их основе. Проведен анализ современного состояния научных исследований в области создания новых типов перспективных ЛБВ миллиметрового и терагерцового диапазонов. Показаны математические модели замедляющих систем таких ЛБВ, а также электронно-оптических магнитных систем формирования и сопровождения электронных пучков с высокой плотностью тока. Приведены методы и примеры расчета.

Для научно-технических работников НИИ, предприятий, ведущих исследование и разработку современных сверхширокополосных ЛБВ в СВЧ-, КВЧ-, ТГЧ-диапазонах. Может быть использована в качестве учебного пособия для студентов вузов, занимающихся вопросами наземной и космической связи, антенными фазированными решетками, передатчиками телевизионного сигнала.

2(533).indd 21 23.06.2017 10:19:48

ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫЕ ПРИБОРЫ

УДК 537.521.1

КОМПРЕССИЯ ПО ВОДОРОДУ В ОТПАЯННЫХ ЭВП

С. А. Вашин, Г. Ф. Корепин

АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино

Рассмотрены причины возникновения компрессии по водороду в отпаянных электровакуумных приборах (ЭВП). Показана связь между компрессией по водороду и нарушением вакуумной электроизоляции в ЭВП. Доказано влияние повышенного газосодержания по водороду в ЭВП на возникновение токов в межэлектродных вакуумных промежутках. Показано, что при наличии напряжённости поля от 20 кВ/мм на промежутке сетка-катод в ЭВП возникает явление гистерезиса вольт-амперной характеристики.

КС: компрессия по водороду, отпаянный ЭВП, вакуумная электроизоляция, вольт-амперная характеристика

HYDROGEN COMPRESSION IN SEALED-OFF VACUUM DEVICES

S. A. Vashin, G. F. Korepin

JSC «RPC «Istok» named after Shokin», Fryazino

The reasons for emerging hydrogen compression in sealed-off electrovacuum devices (EVD) have been considered. The interconnection between the hydrogen compression and the violation of vacuum electrical insulation in EVD is shown. The influence of increased hydrogen gas content in EVD on current emergence in interelectrode vacuum gaps has been proved. It is shown that in the presence of a field strength over 20 kV/mm a hysteresis of the current-voltage characteristic occurs in the grid-cathode gap in EVD.

Keywords: hydrogen compression, sealed-off EVD, vacuum electrical insulation, current-voltage characteristic

1. ВВЕДЕНИЕ

В работах [1, 2] отмечается, что нарушению вакуумной электрической прочности электровакуумных приборов (ЭВП) предшествует появление предпробойных токов (в том числе токов утечки) в вакуумных промежутках. Присутствие на поверхностях электродов микровыступов, слабосвязанных частиц, оксидных пленок, загрязнений, диэлектрических, газовых включений, процессов переноса материалов в порах и возникновение электронной эмиссии из пор и др. определяют величины предпробойных токов [3–7].

Особое внимание заслуживают процессы, связанные с повышенным содержанием водорода в отпаянных ЭВП. Известно, что водород используется в технологии изготовления ЭВП СВЧ и интенсивно диффундирует в объем металлов ЭВП при повышенной температуре или высоком давлении водорода [8].

Применение водорода в качестве буферного газа при откачке ЭВП благоприятно сказывается

2(533).indd 22 23.06.2017 10:19:48

на результатах процесса откачки [9]: снижается работа выхода электронов катода, восстанавливаются окислы металлов. Для обеспечения низкого давления газа в отпаянных ЭВП после использования водорода проводится термическое обезгаживание. Исследования спектрального состава газов приборов, откачанных с применением потока водорода, показали, что парциальное давление водорода в этих приборах всегда выше, чем в ЭВП, процесс обезгаживания которых происходит без применения потока водорода [10, 11].

В работе [11] установлено, что при длительном обезгаживании ЭВП с потоком водорода последующее термическое обезгаживание не всегда приводит к требуемому низкому давлению остаточных газов. Повышенное давление остаточных газов определялось аномально высоким давлением водорода отпаянных ЭВП. Аномально высокое давление водорода отпаянных ЭВП вызывает длительную откачку приборов встроенным электроразрядным насосом, что является хорошим диагностическим средством по определению высокого давления водорода в приборе. Повышенное давление водорода вызвано снижением компрессии водорода форвакуумным насосом откачного поста. Возможные причины повышенного содержания водорода отпаянных ЭВП: физико-химические процессы сорбции и десорбции водорода, наличие полостей скопления газа и др. [11].

ЭВП сверхвысоких частот, как правило, в своем составе имеют встроенные магнитные электроразрядные насосы (НЭМ). Поэтому по величине изменения тока НЭМ в процессе откачки отпаянного ЭВП можно судить не только об изменении давления газов, но и величине компрессии водорода, вызванной аномально высоким давлением водорода, и, следовательно, об изменении потока газов, поступающих в НЭМ, зная быстроту его откачки [11…14].

Целью данной работы является исследование влияния компрессии по водороду на вакуумную электроизоляцию межэлектродных промежутков отпаянных ЭВП, а также динамики изменения давления газа после подачи высокого напряжения между электродами и включения накала катода прибора.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПРЕССИИ ПО ВОДОРОДУ В ОТПАЯННЫХ ЭВП

Исследование компрессии по водороду проводилось на отпаянных высоковольтных ЭВП высокого уровня мощности. Эксперимент осуществляли на ЭВП, прошедших предварительную высоковольтную тренировку, имевших выходную мощность меньше установленной нормы, но годных по остальным параметрам.

Известно, что применение кислот при проведении операции распайки выводов может привести к натеканию, поэтому распайка выводов с использованием кислоты в качестве флюса запрещена. Кроме того, в процессе реакций кислот с металлами выделяется водород, который при давлениях свыше 1000 атм [9, 15] внедряется в металл, такие условия должны способствовать диффузии водорода через металл в вакуумный объем ЭВП. С целью проверки изложенной гипотезы проведены пайка выводов с использованием в качестве флюса фосфорной кислоты H_3PO_4 и оценка влияния выделившегося водорода на характер изменения давления газа в отпаянном ЭВП. При этом исследовались условия возможного изменения в отпаянном ЭВП коэффициента компрессии по водороду [11] и влияние повышенного давления водорода на вакуумную электроизоляцию межэлектродных промежутков.

Изменение остаточного давления газа (водорода) в приборе определялось по величине тока НЭМ во время предварительной высоковольтной тренировки ЭВП в статическом режиме. Одновременно

2(533).indd 23 23.06.2017 10:19:48

проводились измерения токов в промежутках сетка – анод, сетка – катод, а также токов утечки по изоляторам.

Во время включения НЭМ перед экспериментом в приборе зафиксировано давление $1{,}6 \cdot 10^{-4}$ Па, что свидетельствует о том, что ЭВП не имеет течей. В процессе откачки ЭВП давление снижалось до значения не более 10^{-7} Па. Изменения давления газа в ЭВП и тока утечки между сеткой (соединенной с катодом) и анодом при подъеме напряжения приведены на рис. 1. Нормальный режим работы ЭВП соответствует току вакуумного межэлектродного промежутка менее 0,2 мА при максимальном напряжении 36 кВ.

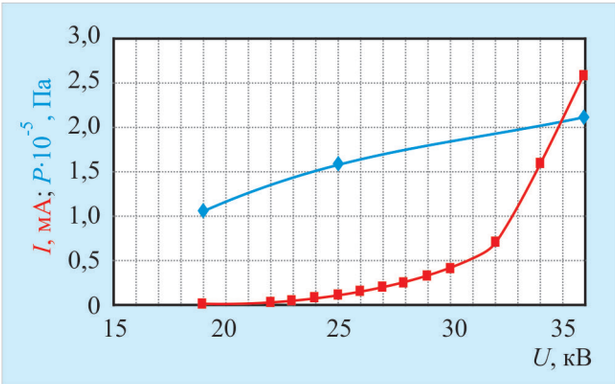


Рис. 1. Изменения давления газа и тока вакуумного межэлектродного промежутка сетка – анод (катод и сетка соединены) в отпаянном ЭВП

Рост напряжения между электродами сопровождается нарастанием газовыделения, которое увеличивается с ростом тока вакуумного межэлектродного промежутка и напряжения. Кривая тока проводимости вакуумного межэлектродного промежутка экспоненциально зависит от напряжения, а кривая газовыделения стремится к насыщению, что соответствует различным причинам изменений этих кривых. Очевидно, что газовыделение обусловлено количеством выделяющегося газа с поверхностей электродов, соответствует истощению источника газовыделения и имеет тенденцию к достижению равновесия выделения и поглощения газа. Если бы кривая газовыделения была близкой по характеру к кривой тока вакуумного межэлектродного промежутка между электродами, то газовыделение было бы обусловлено величиной тока между электродами.

После установления напряженности поля 10,6 кВ/мм (соответствует максимальному напряжению 36 кВ) зафиксировано снижение тока вакуумного межэлектродного промежутка, а также давления остаточного водорода в приборе (рис. 2). Во время всего процесса снижения тока утечки пробоев вакуумного промежутка не наблюдалось.

Во время исследования малого промежутка сетка – катод (катод и анод заземлены), после установления напряженности поля 18,1 кВ/мм не зафиксировано снижение тока вакуумного межэлектродного промежутка, давление остаточного водорода осталось также постоянным (рис. 3). Два противоречивых результата (рис. 2 и 3) подтверждают, что газовыделение происходит под действием нагрева поверхностей электродов, в том числе и за счет наличия тока на вакуумном межэлектродном промежутке.

В зависимости от газонасыщенности электродов наблюдается гистерезис ВАХ. В присутствии пленки окисла гистерезис ВАХ ярко выражен [16]. В нашем случае после высоковольтной трени-

2(533).indd 24 23.06.2017 10:19:48

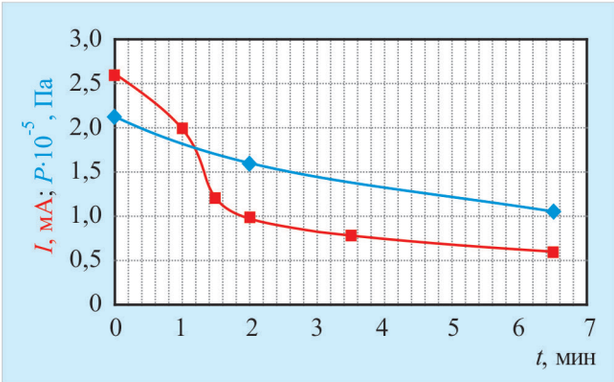


Рис. 2. Изменения тока вакуумного межэлектродного промежутка сетка – анод (сетка и катод соединены) и остаточного давления газов в приборе (напряженность поля между электродами – 10,6 кВ/мм)

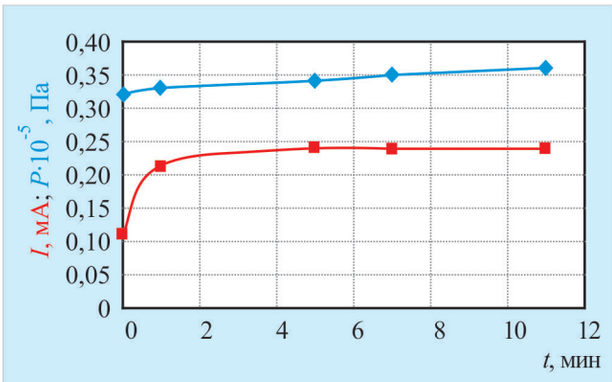


Рис. 3. Изменения тока и остаточного давления газов при подаче напряжения на вакуумный межэлектродный промежуток сетка – катод (катод и анод соединены)

ровки и выдержки прибора в выключенном состоянии в течение 16 ч за счет компрессии по водороду возникает такое же явление гистерезиса ВАХ (рис. 4). За это время вакуум ухудшился до $8{,}5 \cdot 10^{-4}$ Па. Появившийся ток на вакуумном межэлектродном промежутке трудно поддается стандартным методам высоковольтной тренировки от источников постоянного напряжения. Единственный способ уменьшить его – длительная тренировка без балластного сопротивления в электрической цепи между тренируемыми электродами и источником постоянного напряжения тренировочного стенда [17]. В конечном результате тренировки наблюдается тенденция к восстановлению ВАХ до прежней величины (рис. 5). Тенденция сохраняется в силу того, что причины повышения давления газов в ЭВП не устранены.

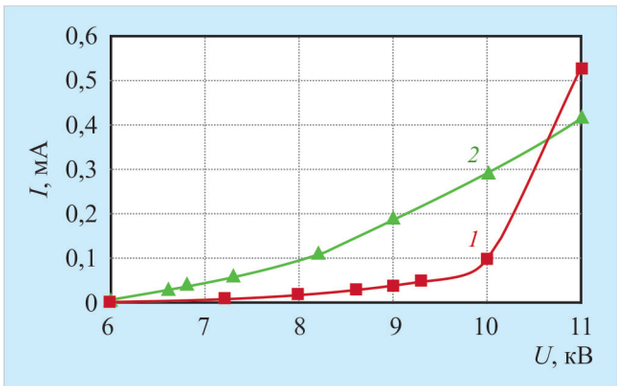


Рис. 4. Гистерезис ВАХ на вакуумном межэлектродном промежутке сетка – катод (катод и анод соединены)

2(533).indd 25 23.06.2017 10:19:49

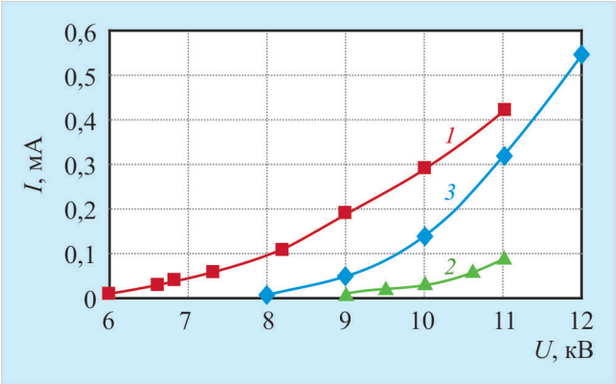


Рис. 5. Изменения ВАХ на различных стадиях исследования вакуумного межэлектродного промежутке сетка – катод (катод и анод соединены):
1 – ВАХ после гистерезиса; *2* – ВАХ после высоковольтной тренировки;
3 – ВАХ после 16 ч выдержки ЭВП в выключенном состоянии

Однако после высоковольтной тренировки ток на вакуумном межэлектродном промежутке удалось значительно снизить (рис. 5, кривая *2*), но после выдержки ЭВП в выключенном состоянии 16 ч происходит смещение ВАХ (рис. 5, кривая *3*) в сторону меньших напряжений.

Наиболее результативным методом повышения электрической прочности ЭВП является обезгаживание прибора [16]. Установлено, что максимум десорбции газов отпаянных и хорошо обезгаженных ЭВП соответствует температуре (110±5) °С [18, 19]. Не всегда возможно провести более эффективное обезгаживание отпаянного ЭВП, так как для этих целей требуется совместить откачку отпаянного ЭВП с его нагревом. В качестве средства откачки может быть использован нагрев катода, при котором откачка проводится испаряющимися активными элементами катода и дополняется откачкой НЭМ, часто встроенным в ЭВП. Очевидно, что время обезгаживания зависит от вакуумной предыстории ЭВП. В частности, от времени нахождения ЭВП на откачном посту после проведения операции обегживания прибора и от величины обратного потока газов откачного поста [9, 19].

Обычно время заметного газовыделения нагреваемого катода отпаянного обезгаженного ЭВП после включения накала катода составляет от доли минуты до 2…3 мин. При этом выделяемый газ фиксируется по току включенного НЭМ.

При наличии компрессии по водороду, где источниками газовыделения в первую очередь являются катод и его подогреватель, а в дальнейшем и другие конструктивные элементы электронной пушки, максимальное давление газов в отпаянном ЭВП достигает $3{,}2\cdot10^{-2}$ Па (рис. 6, начальная часть кривой *1*, до минимума). С 3 по 50 мин (рис. 6, кривая *1*) наблюдается значительное газовыделение не только с катода, но и с различных поверхностей прибора. Для ЭВП без компрессии по водороду время и величина газовыделений существенно меньше. Повторное обезгаживание отпаянных ЭВП, в которых имеется компрессия по водороду, при температурах до 150 °С (рис. 6, кривая *2*) примерно в половине случаев позволяет значительно снизить вероятность возникновения пробоев приборов, работающих в номинальном режиме.

Компрессия по водороду в отпаянных ЭВП приводит к повышенной газонасыщенности поверхностей электродов и самого прибора. Проведенные исследования показывают влияние повышенного газосодержания поверхностей электродов на нарушение вакуумной электроизоляции в ЭВП. Для уменьшения токов межэлектродных промежутков ЭВП необходимо устранить причину

2(533).indd 26 23.06.2017 10:19:49

повышенного давления по водороду в приборах. Такими причинами могут быть неоптимальные режимы технологических процессов откачки, пайки, сварки и др.

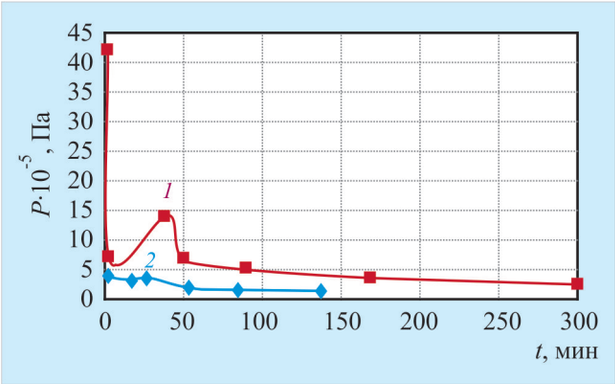


Рис. 6. Изменения давления газов в отпаянном ЭВП после включения накала катода:
1 – первое обезгаживание катода после поступления прибора на высоковольтную тренировку;
2 – второе обезгаживание катода спустя 17 ч после первого обезгаживания

3. ВЫВОДЫ

1. Компрессия по водороду в отпаянных приборах увеличивает токи межэлектродных вакуумных промежутков.

2. Газовыделение вакуумных промежутков во время подачи напряжения между электродами зависит от величины токов этих промежутков.

3. Явление гистерезиса ВАХ в ЭВП с повышенным газосодержанием поверхностей электродов возникает при напряженности электрического поля между электродами выше 20 кВ/мм, что несколько меньше значений при предварительной высоковольтной тренировке, проводимой дозированными пробоями после откачки ЭВП.

4. Высоковольтная тренировка не позволяет избавиться полностью от токов вакуумных межэлектродных промежутков, вызванных повышенным давлением водорода в приборе, в том числе компрессией по водороду.

5. Компрессия по водороду, вызванная любой из причин, в отпаянных ЭВП СВЧ может протекать значительное время. Повторное обезгаживание примерно в половине случаев позволяет значительно снизить вероятность возникновения пробоев приборов, работающих в номинальном режиме.

6. Компрессия по водороду связана не только с физико-химическими процессами внутри ЭВП и вакуумной системы откачного поста, но и с наличием благоприятных условий диффузии водорода в объем отпаянного ЭВП.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Латам, Р.** Вакуумная изоляция установок высокого напряжения / Перевод с англ. Р. Латам. – М.: Энергоатомиздат, 1981.

2. **Сливков, И. Н.** Электрический пробой и разряд в вакууме / И. Н. Сливков, В. И. Михайлов, Н. И. Сидоров, А. И. Настюха. – М.: Атомиздат, 1966.

3. **Пошехонов, П.** В. Исследование механизмов пробоя высоковольтных импульсных модуляторных приборов и методы повышения их электрической прочности: автореф. дис. д.т.н. / П. В. Пошехонов. – Рязань: Радиотехнический ин-т, 1966.

2(533).indd 27 23.06.2017 10:19:49

4. **Татаринова, Н. В.** Влияние процессов в порах поверхностей электродов на вакуумную электроизоляцию: дис. д.ф-м.н. / Н. В. Татаринова. – М.: МИФИ, 1998.

5. **Корепин, Г. Ф.** Моделирование процессов термовакуумной обработки мощных СВЧ-приборов с целью повышения их электрической прочности / Г. Ф. Корепин, А. Б. Киселев // 4 Международная научно-практическая конференция «Участие молодых ученых, инженеров и педагогов в разработке и реализации инновационных технологий»: сб. науч. докл. – М., 2003. – С. 224 – 232.

6. **Зильберман, М. М.** Вакуумный пробой в высоковольтном триоде с оксидно-никелевым катодом / М. М. Зильберман, М. Л. Когель // Материалы конференции «Вакуумная наука и техника», Крым. – 2002. – С. 331 – 333.

7. **Новоселец, В. И.** О вакуумных пробоях в многолучевых мощных пролетных клистронах на высшем и основном виде колебаний / В. И. Новоселец // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2008. – Вып. 2. – С. 53 – 61.

8. **Гладков, А. С.** Пайка деталей электровакуумных приборов / А. С. Гладков, О. П. Подвигина, О. В. Чернов. – М.: Энергия, 1967.

9. **Черепнин, Н. В.** Основы очистки, обезгаживания и откачки в вакуумной технике / Н. В. Черепнин. – М.: Советское радио, 1967.

10. **Сытник, А. Я.** Газовыделение и активировка металлопористого катода в условиях откачки электровакуумного прибора / А. Я. Сытник // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1980. – Вып. 12. – С. 27 – 30.

11. **Корепин, Г. Ф.** Динамика коэффициента компрессии форвакуумного насоса по водороду / Г. Ф. Корепин, А. И. Полевич // Вакуумная техника и технология. – 2004. – Т. 14. – № 3. – С. 139 – 147.

12. **Ланис, В. А.** Техника вакуумных испытаний / В. А. Ланис, Л. Е. Левина. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963.

13. **Саксаганский, Г. Л**. Электрофизические вакуумные насосы / Г. Л. Саксаганский. – М.: Энергоатомиздат, 1988.

14. **Васильев Г. Л.** Магниторазрядные насосы / Г. Л. Васильев. – М.: Энергия, 1970.

15. **Колачев, Б. А.** Водородная хрупкость цветных металлов / Б. А. Колачев. – М.: Металлургия, 1966.

16. **Татаринова, Н. В.** Вакуумная электроизоляция (обзор) / Н. В. Татаринова // Вакуумная техника и технология. – 2003. – Т. 13. – № 1. – С. 3 – 28.

17. **Вашин, С. А.** Метод снижения токов утечки изоляторов отпаянных ЭВП / С. А. Вашин, Г. Ф. Корепин, Н. Н. Климова // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2016. – Вып. 1(528). – С. 23 – 30.

18. **Корепин, Г. Ф.** Критическое время обезгаживания ЭВП СВЧ / Г. Ф. Корепин, Н. Н. Климова, А. Я. Сытник // Вакуумная техника и технология – 2003: тез. докл. Санкт-Петербург. – 2003. – С. 117.

19. **Корепин, Г. Ф.** Определение причин повышения давления в вакуумной системе в процессе откачки электровакуумных приборов / Г. Ф. Корепин, А. И. Полевич // Материалы НТС «Вакуумная техника и технология». Секция 2. Элементы вакуумных систем. Санкт-Петербург. – 2004. – С.103 – 104.

Статья поступила 15 февраля 2017 г.

2(533).indd 28 23.06.2017 10:19:49

УДК 621.385.69

МОЩНЫЙ ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ МЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

А. В. Галдецкий, М. И. Лопин, Р. В. Грицук, В. А. Рыжов, Т. А. Мишкин, Н. Г. Духина, А. Д. Закурдаев, Л. А. Сапрынская

АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино

Разработан мощный компактный усилитель метрового диапазона на основе многолучевых клистродов (истронов). Существенного уменьшения габаритов удалось добиться благодаря использованию входной цепи на сосредоточенных элементах, входного развязывающего устройства на основе длинных линий, выходной резонансной системы на квазисосредоточенных элементах, причем коллектор является частью выходной системы.

КС: мощный компактный усилитель, метровый диапазон, многолучевой клистрод, сосредоточенный элемент, длинная линия, квазисосредоточенный элемент

HIGH-POWER ELECTROVACUUM AMPLIFIER OF A METER RANGE

A. V. Galdetskiy, M. I. Lopin, R. V. Gritsuk, V. A. Ryzhov, T. A. Mishkin, N. G. Dukhina, A. D. Zakurdaev, L. A. Saprynskaya

JSC «RPC «Istok» named after Shokin», Fryazino

High-power compact amplifier of a meter range based on multiple-beam klystrodes (istrons) has been developed. We managed to achieve significant reduction in size thanks to using the input circuit on lumped elements, input decoupling unit based on long lines, output resonance system on quasi-lumped elements with the collector being a part of the output system.

Keywords: high-power compact amplifier, meter range, multiple-beam klystrode, lumped element, long line, quasi-lumped element

1. ВВЕДЕНИЕ

За последние 15 лет клистрод (Inductive Output – IOT) достаточно подробно рассматривался в зарубежных и отечественных работах [1–11]. Однако практическое применение этот ЭВП СВЧ нашел только в немногих направлениях электронной техники, требующих высокого КПД: в цифровых телевизионных передатчиках, системах запитки ускорителей элементарных частиц для промышленных и научных исследований [12, 13], в экспериментах по нагреву ионосферы [14, 15]. Применение клистрода в качестве мощного усилителя в РЛС тормозилось в основном невысокой рабочей частотой (до 1,3 ГГц), малым коэффициентом усиления (до 20 дБ), относительно небольшой полосой усиления при наличии, тем не менее, таких очевидных достоинств мощного усилителя, как высокий КПД (в том числе при малых сигналах), компактные размеры, возможность низковольтного сеточного управления (или модуляции входным ВЧ-сигналом).

2(533).indd 29 23.06.2017 10:19:49

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В настоящее время опять возрос интерес к РЛС в метровом диапазоне, что заставляет вновь обратиться к клистроду, как к мощному компактному усилителю с высоким КПД и широкой полосой частот. В работе требуется получить выходную импульсную мощность усилителя не менее 500 кВт при полосе пропускания по однодецибельному уровню 20 %. Коэффициент усиления должен быть не менее 32 дБ.

Из-за высокой выходной мощности было решено использовать ЭВП, причем в данном диапазоне клистрод имел существенное преимущество перед клистроном благодаря компактным размерам. Чтобы увеличить полосу пропускания клистрода пришлось допустить малую нагруженную добротность резонаторов и большой суммарный ток пучков, а для сохранения (небольшого увеличения) коэффициента усиления было решено применить усилительную цепочку из двух многолучевых клистродов (истронов). Дополнительный группирующий резонатор мог бы несколько увеличить усиление лампы [16–19], но привел бы к значительному увеличению габаритных размеров прибора, поэтому было принято решение его не использовать.

3. КОНСТРУКЦИЯ ЦЕПОЧКИ

Цепочка представляет собой комплексированное изделие из двух многолучевых истронов (входного и выходного), расположенных на общей платформе (рис. 1). Каждый истрон представляет собой 36-лучевую лампу с сеточным управлением, фокусирующим электромагнитом, съемными выходной резонаторной системой и входным согласующим устройством (рис. 2). Вывод энергии входного истрона соединен со входом выходного истрона через ферритовый циркулятор *28* посредством коаксиального перехода; конструктивно оба истрона практически идентичны и отличаются лишь напряжением смещения и током покоя. Использование 36-лучевой электронной оптики позволяет увеличить суммарную электронную проводимость, снизить напряжение питания приборов и расширить мгновенную полосу частот истронов.

а)

Рис. 1. Внешний вид (*а*) и чертеж (*б*) усилительной цепочки из двух истронов (см. также с. 31)

2(533).indd 30 23.06.2017 10:19:50

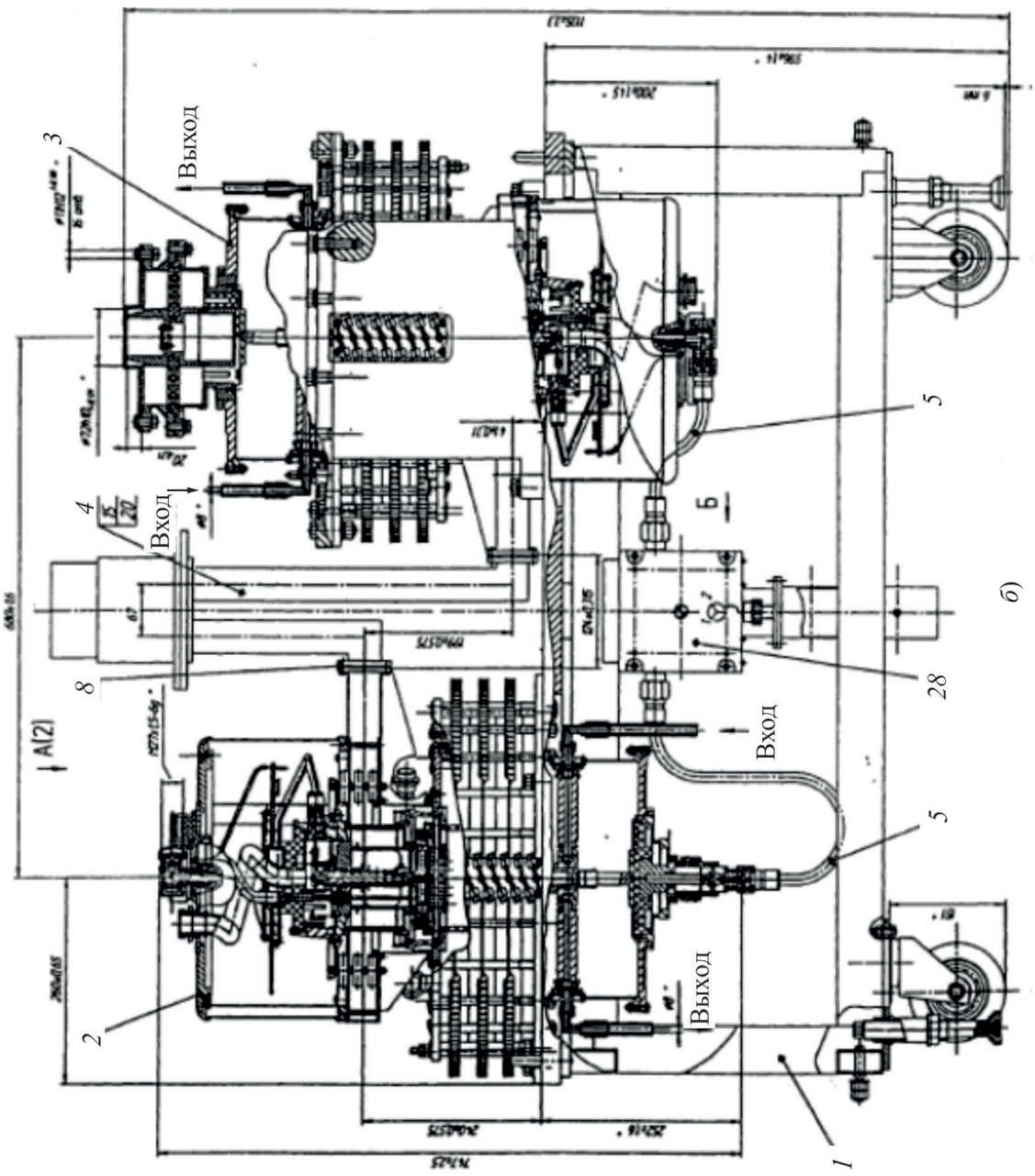


Рис. 1. Внешний вид (*а*) и чертеж (*б*) усилительной цепочки из двух истронов (окончание)

2(533).indd 31 23.06.2017 10:19:50

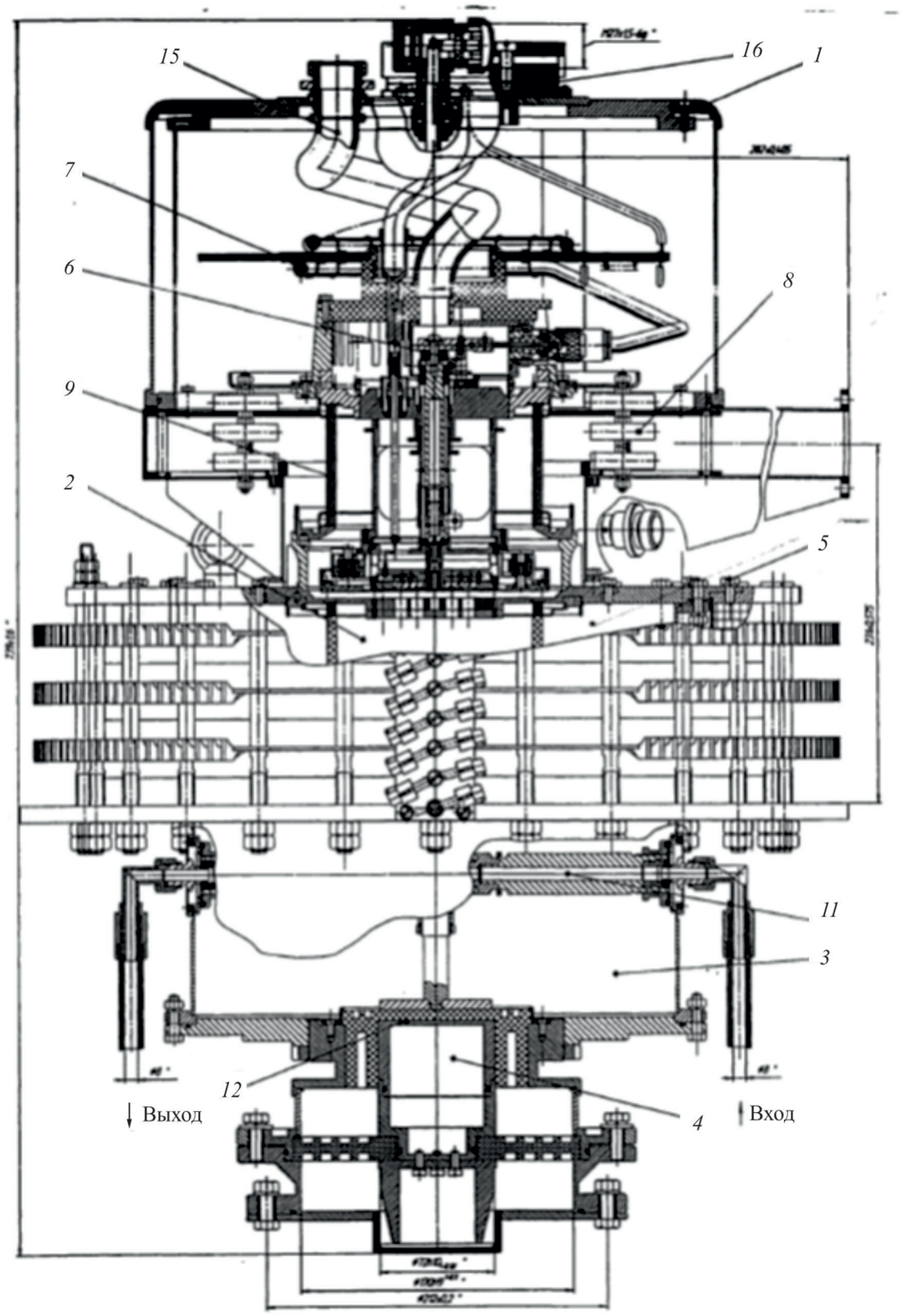


Рис. 2. Чертеж истрона

2(533).indd 32 23.06.2017 10:19:51

Проведенные расчеты позволили выбрать следующие основные параметры (табл. 1).

Таблица 1

Параметр	Выходной истрон	Входной истрон
Анодное напряжение, кВ	25	25
Импульсный ток, А	40	20
Число электронных пучков	36	36
Диаметр парциального катода, мм	10	10
Зазор сетка – катод, мм	0,22	0,22
КПД, %	≥ 60	3
Коэффициент усиления, дБ	16,5	16,5
Полоса пропускания по уровню 1 дБ, %	27	27

В отличие от традиционной конструкции, здесь входное устройство *1* представляет собой согласующий полосовой фильтр на сосредоточенных элементах. Его электрическая схема представлена на рис. 3. Для регулировки полосы пропускания применяется подстроечный конденсатор *6* марки К15У-1. Для изоляции входной цепи от высокого напряжения управляющей сетки использована оригинальная развязка по высокому напряжению *7*. Блокировочный конденсатор *8* заземляет по высокой частоте сеточный электрод лампы. Одновременно он предотвращает проникновение входного сигнала из пространства анод – сетка в полость входного устройства, т. е. обратную связь во входном устройстве.

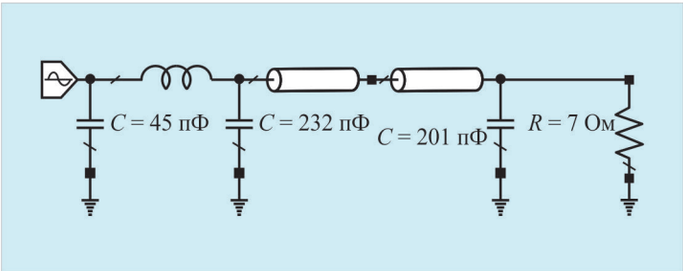


Рис. 3. Схема входной согласующей цепи клистрода

Конструкция клистрода разборная. Вакуумная лампа включает в себя катодную ножку, в которую входят катодно-сеточный узел и катодный изолятор *9*, и высокочастотный зазор активного резонатора выходной связанной системы резонаторов. Причем выходная труба этого резонатора переходит в 36-лучевой коллектор *10*, охлаждаемый жидкостью, которая подводится и выводится посредством двух радиальных труб *11*. Эти трубы разделяют активный и коаксиальный пассивный резонаторы с укорачивающей емкостью *12*.

Входное устройство и катодная ножка истрона охлаждаются воздушным потоком, который поступает в указанный узел по цилиндрическому патрубку *15*. Питающие напряжения и входная мощность подводятся к выводам, которые закреплены на колодке *16* входного устройства.

На подвижной вышеупомянутой платформе закреплены два соленоида (по одному для каждого истрона). В соленоиде закреплены полость активного резонатора и пассивный резонатор с вы-

2(533).indd 33 23.06.2017 10:19:51

водом энергии. При выходе прибора из строя заменяется только вакуумная лампа, которая устанавливается в полость активного резонатора и закрепляется в ней с помощью болтов.

3.1. Входная согласующая цепь истрона

Трансформатор сопротивлений

Традиционно в качестве входной согласующей цепи клистрода использовался объемный тороидальный резонатор, включающий высоковольтные разделительные и блокировочные конденсаторы для развязки цепей входного сигнала и цепей подачи напряжения на катод и сетку. Однако, учитывая, что требуемая полоса частот прибора составляет 20 % (в отличие от приблизительно 1 % для телевизионных истронов), в данном случае потребовалась бы более сложная двухсвязная система из двух резонаторов, связанных между собой и с входным трактом. Это влечет существенное увеличение габаритных размеров резонаторов и всей согласующей системы в целом, учитывая, что рабочая частота прибора в несколько раз ниже, чем характерные частоты дециметровых телевизионных истронов. По этой причине было принято решение реализовать согласующую цепь на сосредоточенных элементах. При этом была сделана попытка обеспечить минимальный импеданс электронного пучка во входном зазоре для того, чтобы минимизировать влияние емкости зазора и обеспечить широкополосную связь с входным трактом.

Исходными данными для проектирования цепи являются параметры входного зазора с учетом электронной нагрузки. Емкость входного зазора составляет 200 пФ, импеданс электронного пучка – около 7 Ом. Под эти параметры оптимизировались номиналы элементов схемы, показанной на рис. 3. Частотная зависимость цепи КСВН показана на рис. 4. Видно, что согласующая цепь обеспечивает КСВН менее 1,24 в рабочей полосе.

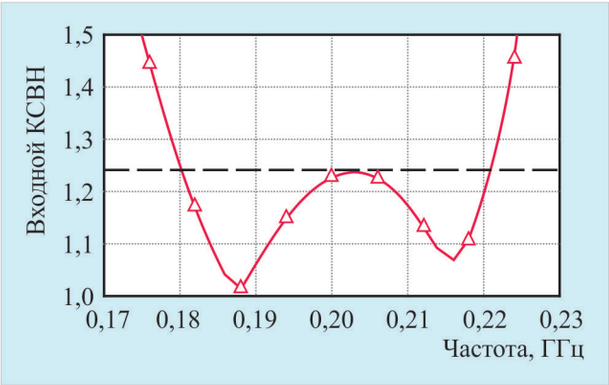


Рис. 4. АЧХ КСВН согласующей цепи

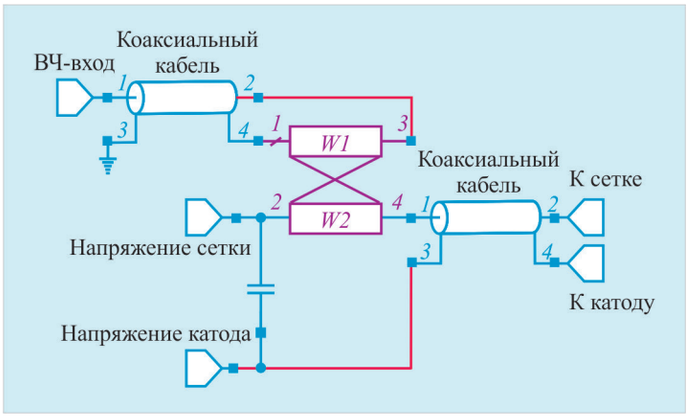
Блокировочная цепь

Для развязки входного ВЧ-тракта от высоковольтных цепей питания и подачи напряжения смещения традиционно используются высоковольтные высокодобротные блокировочные конденсаторы достаточно большой емкости ($C_{бл} >> C_{заз}$), что в нашем случае превысит 1000 пФ. При этом трудно избавиться от влияния паразитных реактивностей. Как альтернатива нами

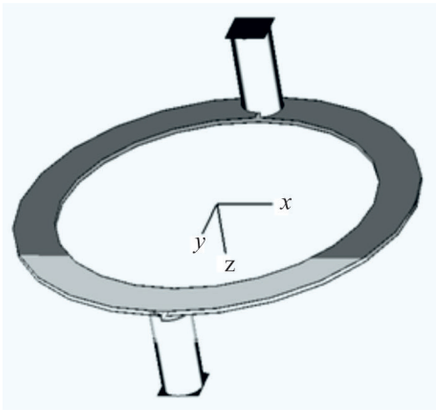
2(533).indd 34 23.06.2017 10:19:52

был использован в качестве развязывающей цепи трансформатор 1:1 на длинных линиях, в котором паразитные реактивности компенсируют друг друга, давая возможность получить очень широкую полосу при сравнительно небольших габаритных размерах. Трансформатор выполнен на пластине фольгированного фторопласта ФАФ-4 толщиной 4 мм. Виток на «верхней» поверхности трансформатора находится под потенциалом земли, виток на «нижней» поверхности – под высоким напряжением. Внешний вид блокировочной цепи показан на рис. 5. На рис. 6 показано место соединения коаксиала с трансформатором.

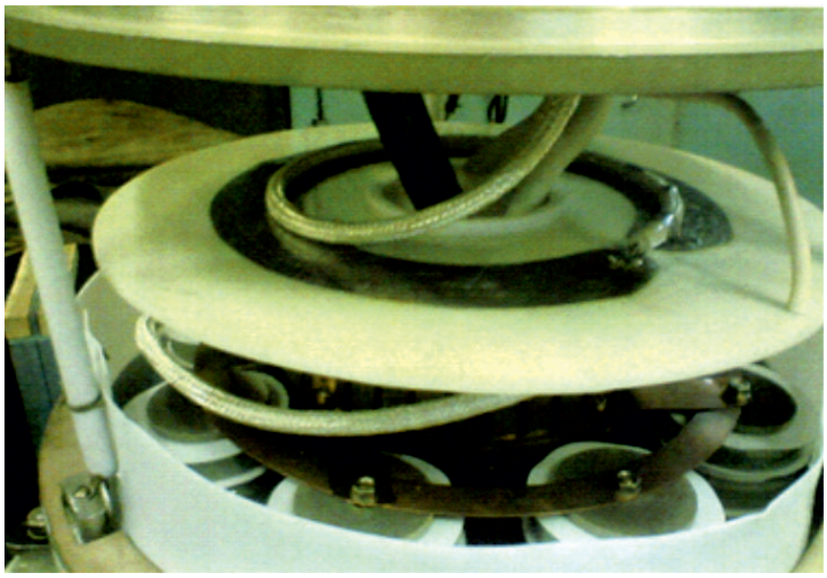
Частотная зависимость КСВН блокировочной цепи показана на рис. 7. Как видно из графика, предложенная блокировочная цепь обеспечивает почти октавную полосу частот на уровне КСВН менее 1,15



а)



б)



в)

Рис. 5. Схема (*а*), модель (*б*) и внешний вид (*в*) блокировочной цепи на основе длинных линий

2(533).indd 35 23.06.2017 10:19:52

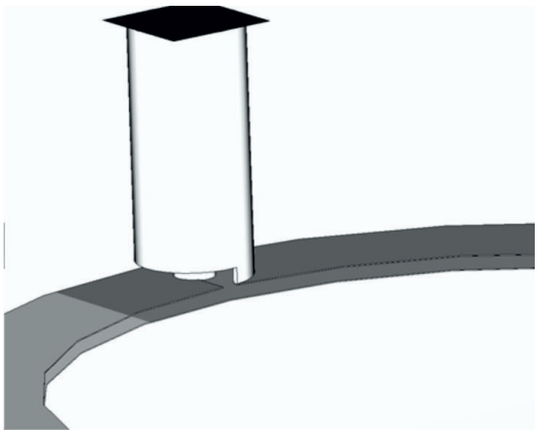


Рис. 6. Соединение входного коаксиала
с полоской трансформатора

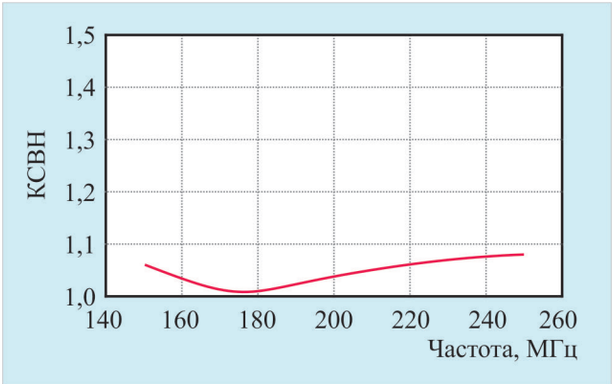


Рис. 7. АЧХ КСВН блокировочной цепи

3.2. Выходная резонаторная система

Выходная резонаторная система должна обеспечить отбор энергии от сгруппированного электронного потока и передать ее в антенный фидер во всей полосе рабочих частот прибора. При этом необходимо обеспечить подвод охлаждающей жидкости к коллектору, находящемуся внутри активного резонатора, и ограничить вакуумную область. Кроме того, система должна иметь минимальные габариты.

Исходя из величины выходной импульсной мощности (550 кВт) и амплитуды первой гармоники сгруппированного тока, поступающего из входного резонатора (60 А), определяем, что действительная часть импеданса рабочего зазора активного резонатора во всей рабочей полосе должна превышать 300 Ом. Для уменьшения габаритных размеров резонансной системы в ней были использованы квазисосредоточенные элементы.

На рис. 8 представлен эскиз общего вида резонаторной системы. Основные размеры: внешний диаметр – 300 мм, высота резонаторов – 151 и 68 мм, зазор активного резонатора – 30 мм. На рис. 9 показаны АЧХ действительной части и модуля импеданса выходного резонатора.

2(533).indd 36 23.06.2017 10:19:52

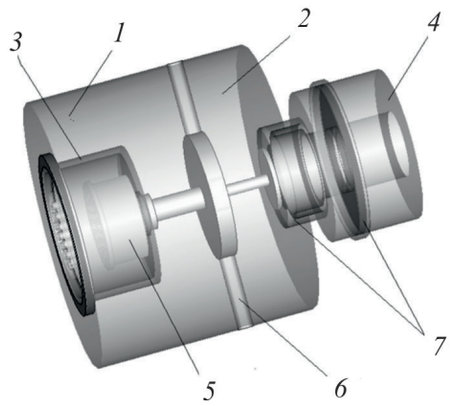


Рис. 8. Схема выходного резонатора:
1 и *2* – активный и пассивный резонаторы; *3* – керамический изолятор, ограничивающий вакуумную область; *4* – выходной коаксиал; *5* – коллектор; *6* – индуктивные элементы резонатора, служащие одновременно для подвода охлаждающей жидкости к коллектору; *7* – тефлоновые изоляторы

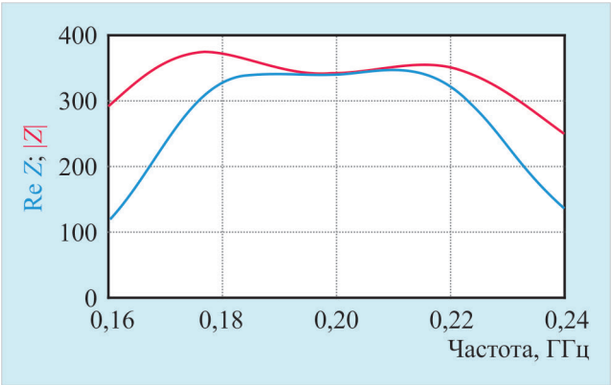


Рис. 9. АЧХ действительной части и модуля импеданса выходного резонатора

Выходная резонаторная система (рис. 10) представляет собой резонансное устройство, обладающее двумя видами колебаний: синфазным и противофазным. Относительно названия резонатора мнения в процессе работы трансформировались: либо это коаксиальный резонатор, нагруженный с двух концов на укорачивающие емкости, либо это система из двух связанных резонаторов, один из которых тороидальный, а другой – коаксиальный с укорачивающей емкостью. В результате решили, что это сложный резонатор с двумя видами колебаний.

В любой трактовке резонатора, в соответствии с расчетом, полоса рабочих частот 20 % получается лишь в том случае, если одновременно работают (нагружены) оба вида.

Конструктивная особенность резонатора – отсутствие элементов оперативной настройки и подстройки, особенно при работе на динамических испытаниях. Эквивалентная схема резонатора представлена на рис. 11. Все реактивные элементы есть элементы конструкции.

Относительно оперативно можно было изменять только емкость C_2 (емкость центрального коаксиала с выводом энергии).

Результаты холодных измерений показали: один вид колебаний расположен в центре рабочей полосы на частоте 203 МГц, второй смещен в короткую сторону в пределах 1 ГГц.

Путем введения в рабочий объем резонатора дополнительных перестраиваемых конструктивных элементов мы получили резонансную характеристику, близкую к требуемой (рис. 12).

2(533).indd 37 23.06.2017 10:19:53

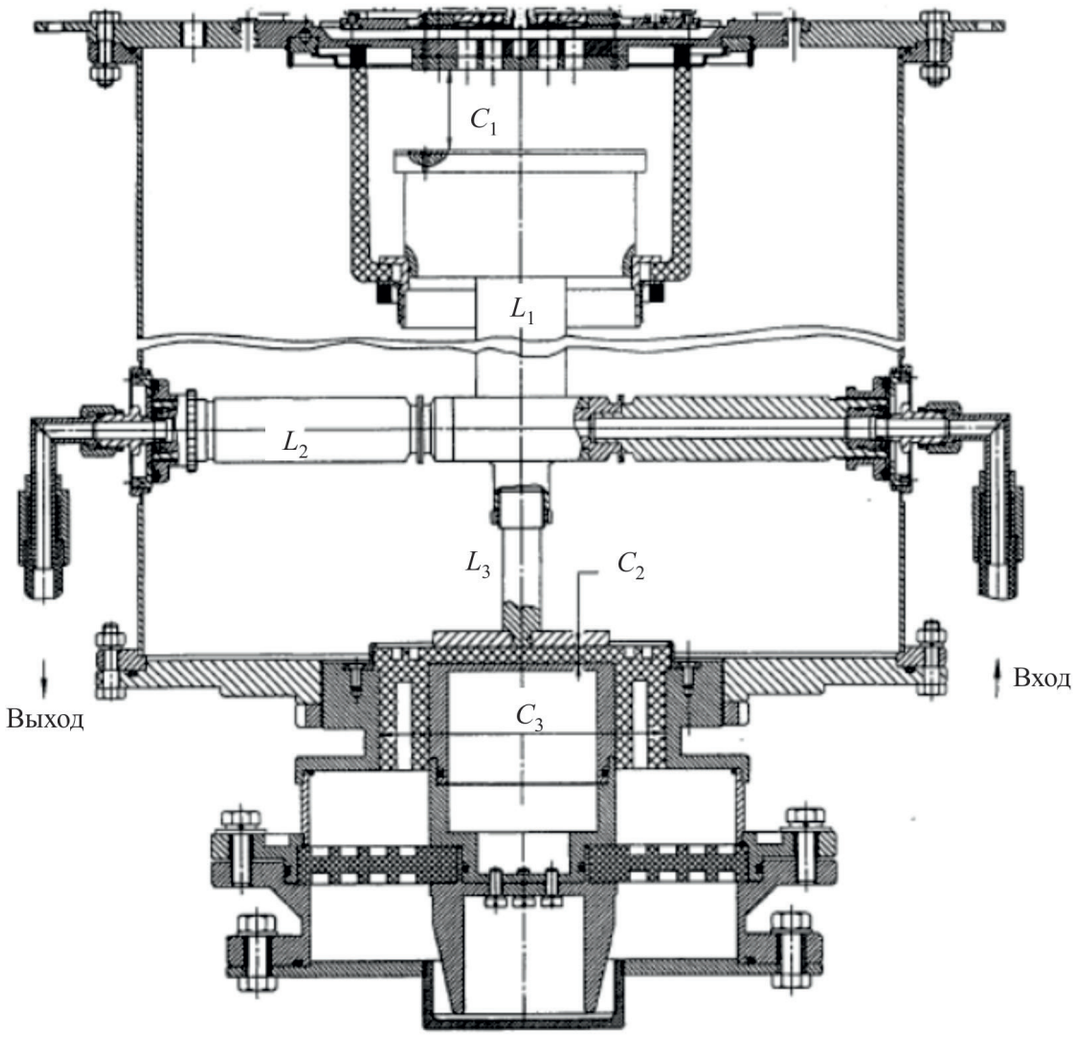


Рис. 10. Выходная резонаторная система

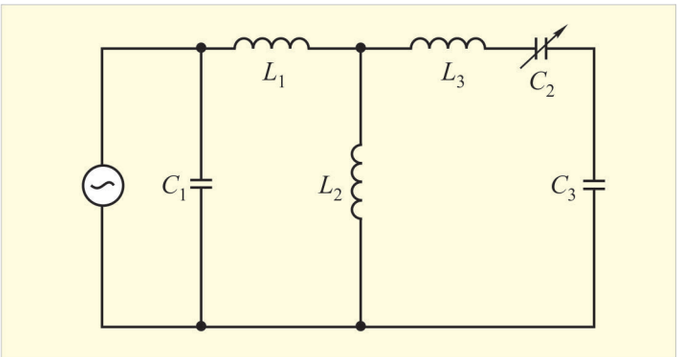
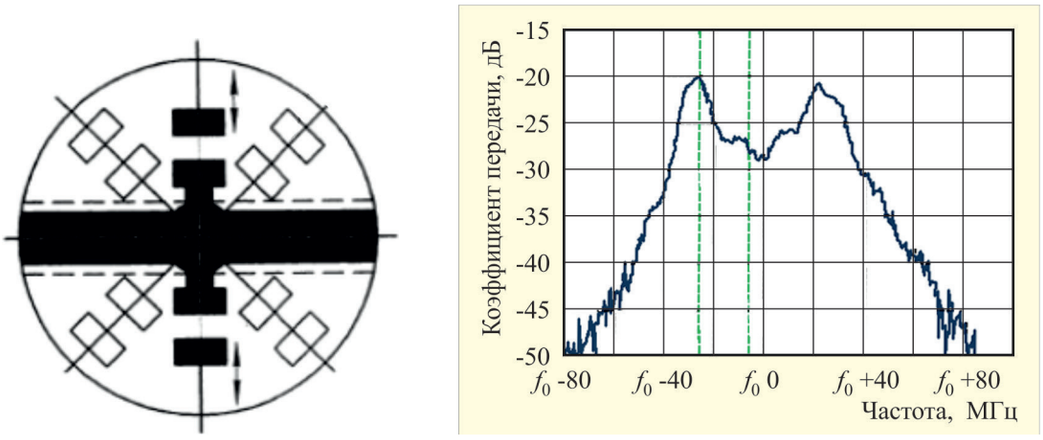


Рис. 11. Эквивалентная схема резонаторной системы

2(533).indd 38 23.06.2017 10:19:53



а) *б*)

Рис. 12. Модернизированное выходное устройство (*а*) и его резонансная характеристика (*б*)

3.3. Электронно-оптическая система истрона

36-лучевая электронно-оптическая система (ЭОС) обеспечивает низковольтное управление многолучевого потока и высокое токопрохождение его на коллектор.

Особенности фокусирующей электромагнитной системы

При проектировании ЭОС истрона (электронной пушки, коллектора, магнитной системы – соленоида) необходимо было учитывать особенности конструкции всего прибора в целом.

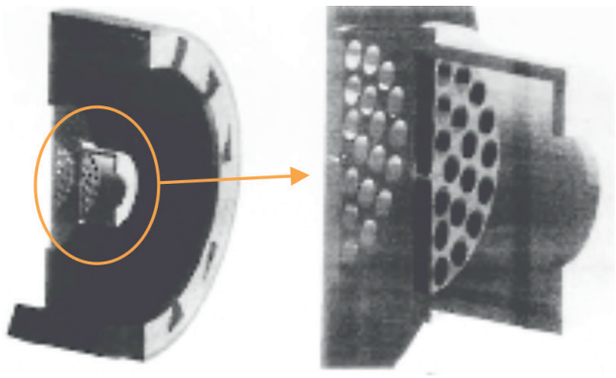
Первой и главной особенностью прибора является то обстоятельство, что один из элементов магнитной системы (коллекторный полюсный наконечник) является одновременно и внутренним электродом двухсвязного выходного резонатора; он не завязан в общую магнитную цепь, а его поперечные размеры меньше поперечных размеров катодного полюсного наконечника со стороны пушки. Несоразмерность полюсных наконечников вызывает появление большой поперечной составляющей магнитного поля на осях периферийных пучков многолучевого потока в первом зазоре выходного резонатора, между катодным и коллекторным полюсными наконечниками, которая отклоняет центры парциальных пучков от своих осей и ухудшает их прохождение на коллектор. В процессе проектирования ЭОС было найдено техническое решение для достижения однородности индукции поля в рабочем зазоре.

На рис. 13 показаны общий вид магнитной системы и ее фрагмент в области межполюсного зазора.

На рис. 14 приведены расчетные данные по распределению продольной и поперечной составляющих индукции поля. Отношение поперечной и продольной составляющих индукции поля в наихудшей точке равно около 2 %, что является достаточно хорошим показателем качества однородности поля в зазоре.

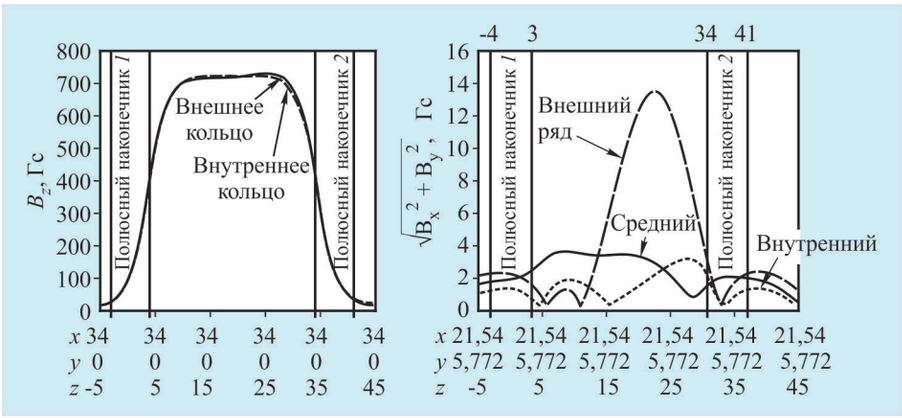
Для лучшего подавления поперечной составляющей магнитного поля на осях парциальных пучков центральная часть катодного полюсного наконечника диаметром 86 мм и торец коллекторного полюсного наконечника диаметром 100 мм могут быть выполнены из пермаллоя (сталь 49 КФ).

2(533).indd 39 23.06.2017 10:19:54



а) *б*)

Рис. 13. Разрез магнитной системы (*а*) и межполюсного зазора (*б*)



а) *б*)

Рис. 14. Распределение продольной (*а*) и поперечной (*б*) компонент индукции поля вдоль осей пролетных каналов

При достигнутом уровне поперечной составляющей индукции поля центры парциальных пучков незначительно смещаются относительно осей пролетных каналов (рис. 15, 16).

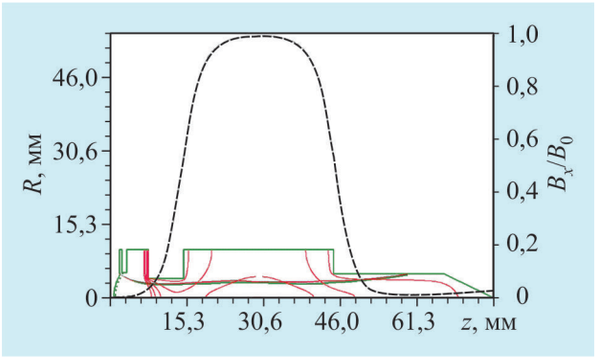


Рис. 15. Результаты расчета ЭОС в двумерном приближении

2(533).indd 40 23.06.2017 10:19:54

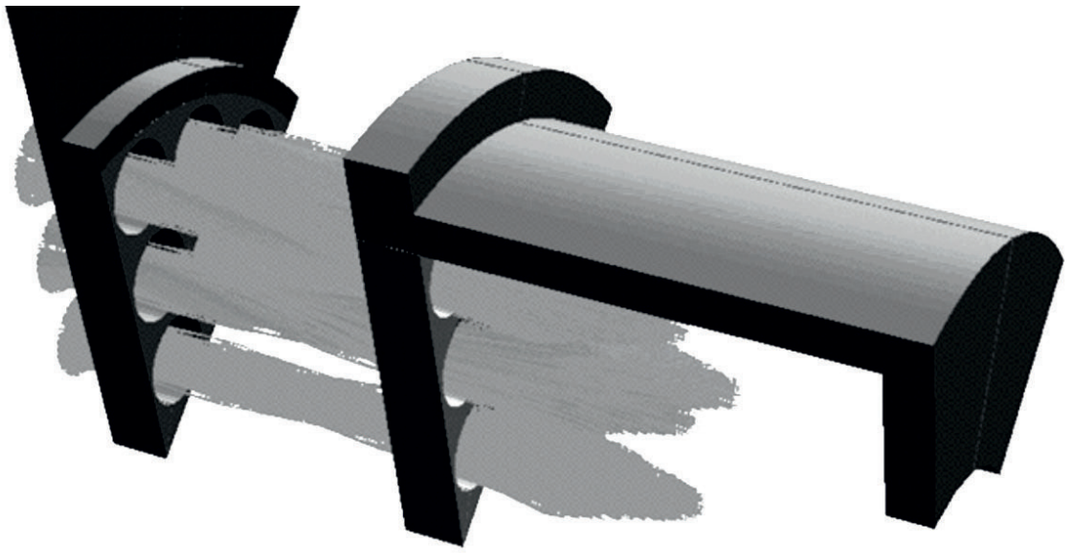


Рис. 16. Результаты траекторного анализа ЭОС
на основе трехмерной модели

Коллектор

Коллектор является системой из трех вложенных друг в друга колец, содержащих 6, 12 и 18 соответственно конусных полостей – парциальных коллекторов. Внутреннее кольцо содержит 6 парциальных коллекторов и т. д. Охлаждение коллектора осуществляется пропусканием жидкости по N радиальным круглым каналам, расположенным между полостями парциальных коллекторов. Длина этих каналов – 10 мм; диаметр во внутреннем кольце – 2 мм, в среднем – 1,4 мм, во внешнем – 1,2 мм. Кольцевые каналы служат для перераспределения жидкости, в связи с изменением числа радиальных каналов от кольца к кольцу. Охлаждающая жидкость обтекает каналы верхнего этажа (в каждом промежутке между парциальными коллекторами и двумя парциальными каналами) от внутреннего кольца к внешнему, по среднему этажу возвращается обратно и по нижнему этажу вновь проходит от внутреннего кольца во внешнее и на выход.

Расход охлаждающей жидкости не превышает 15 л/мин, при этом температура хладагента находится в пределах (70±15) °С.

Коллекторы парциальных пучков имеют вид цилиндрической поверхности с внутренним диаметром 10 и длиной 22 мм, с коническим дном длиной 10 мм (рис. 17).

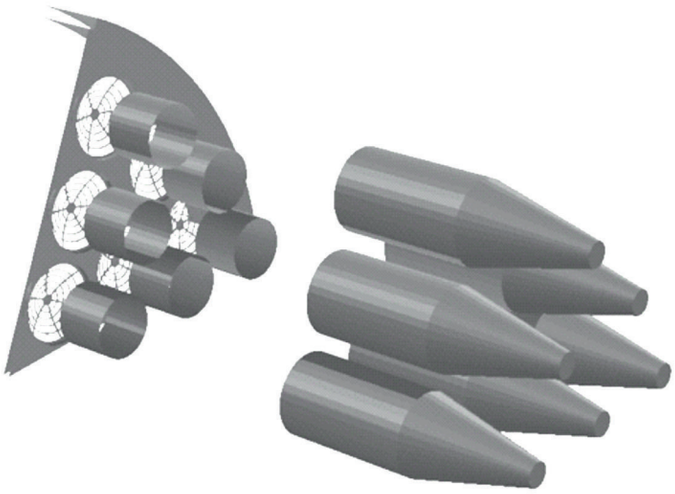


Рис. 17. Общий вид ЭОС
(1/6 часть)

2(533).indd 41 23.06.2017 10:19:55

Электронная пушка

Электронная пушка содержит 36 сферических отдельных катодов диаметром 10 мм, расположенных на едином молибденовом держателе соосно отверстиям в полюсных наконечниках на плоской поверхности катода диаметром 80 мм. Радиус сферы катодов – 10 мм. Центры отверстий расположены на трех концентрических окружностях с диаметрами 22,5, 44,6 и 68 мм, количество отверстий на указанных окружностях равно 6, 12 и 18 соответственно.

Чтобы совместить 36 катодов, сеток, анодных отверстий и отверстий коллектора, а также выдержать заданные расчетные расстояния между ними, используется специальная оснастка.

Над каждым из катодов на общем держателе расположены мелкоструктурные сетки радиально-кольцевого типа (рис. 18). Они состоят из 4-х кольцевых перемычек шириной 0,1 мм, соединенных 6-ю радиальными перемычками шириной 0,2 мм. Толщина сеток (вдоль продольной оси пушки) составляет 0,1 мм. Центры сеток выполнены в виде круга диаметром 1,5 мм. Радиусы сфер внутренней (обращенной к катоду) и внешней (обращенной в сторону анода – катодного полюсного наконечника) поверхностей равны 9 и 8,9 мм соответственно. Расстояние от поверхности катодов до центров сеток – 0,22 мм. Толщина держателя сеток – 1 мм. Расстояние от держателя сеток до анода – 4,3 мм. Пролетный канал для каждого парциального пучка представляет собой отверстие в катодном полюсном наконечнике диаметром 8 мм (медная втулка), межполюсный зазор имеет длину 30 мм.

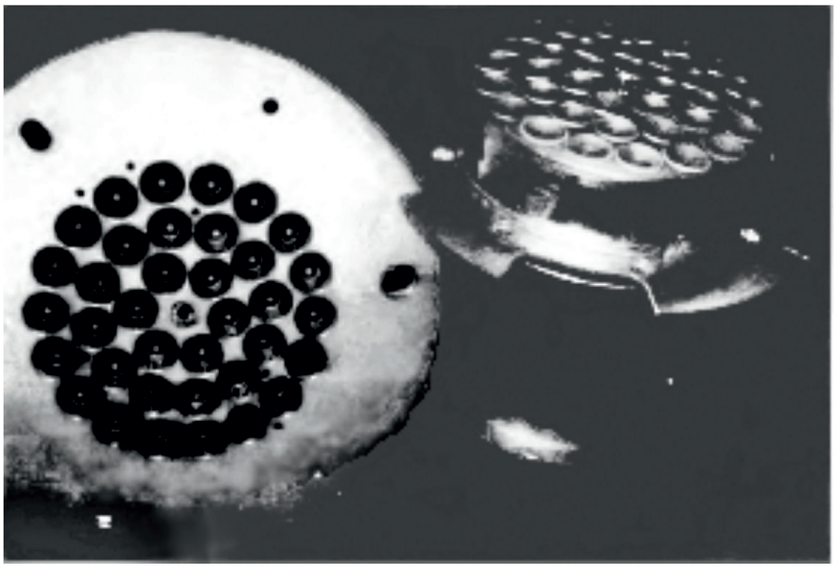


Рис. 18. Катодный и сеточный узлы

Определенную сложность в технологии изготовления представляет блок управляющих сеток катодно-сеточного узла (рис. 19). Каждая операция при изготовлении одной сетки: многократный отжиг, формовка сферы, вырезка миниатюрных перемычек сечением 0,1×0,1 мм, окончательная проточка по габаритному размеру, антиэмиссионное покрытие палладием, а также одновременная пайка их на молибденовом диске в единый блок – связана с применением специальной оснастки и оборудования.

Требуемая величина тока и напряжение запирания определены из условия получения заданного уровня выходной мощности и коэффициента усиления прибора. С использованием

2(533).indd 42 23.06.2017 10:19:55

моделирования на двумерных и трехмерных математических моделях спроектирована оптимальная многолучевая ЭОС с сеточным управлением.

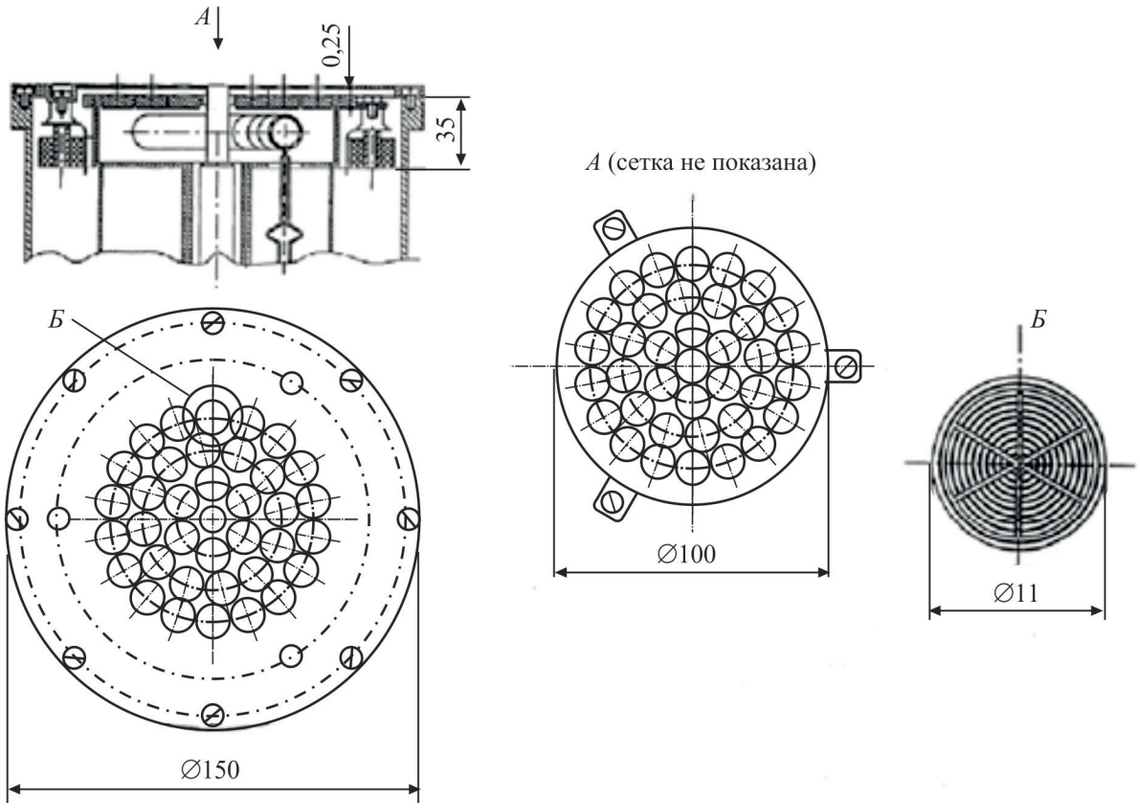


Рис. 19. Катодно-сеточный узел

4. ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Практическая реализация расчетных параметров истронов внесла существенные коррективы в первоначальные результаты расчета. Разработка усилительной цепочки истронов в метровом диапазоне длин волн потребовала, в первую очередь, разработки базовой конструкции. Конструктивно-технологическая реализация истронов, работающих на центральной частоте 200 МГц, с полосой рабочих частот 20 %, потребовала нестандартных технических решений и определялась в решающей степени возможностями технологии и производства. В частности, ограничения на максимальные размеры керамики приводят к напряженному тепловому режиму электронной пушки истрона. Отсутствие ряда технологических процессов, ограниченные возможности металлорежущего оборудования при изготовлении размерных деталей из молибдена существенно ограничили возможности реализации расчетных параметров истронов.

4.1. Требования к параметрам

Полоса рабочих частот – 20 %. Первоначально предполагалось получить параметры, приведенные в графе 1 (табл. 2).

2(533).indd 43 23.06.2017 10:19:56

Таблица 2

Номер п/п	P_{Ω}, кВт	Δf, %	$K_{ус}$, дБ
1	550	20	32
2	330	20	30

Однако практическая реализация расчетных параметров столкнулась с рядом технологических трудностей, которые не позволили получить расчетные величины. В окончательном варианте первоначальные величины параметров (выходная мощность и коэффициент усиления) изменились до значений, приведенных в графе 2.

Трансформация параметров из графы 1 в графу 2 произошла из-за невозможности получения заданного в расчетах тока катода 150 А.

Причины:

А. Конструктивная. На рис. 18 представлены катодный и сеточный узлы. На молибденовых держателях на трех концентрических окружностях расположены 36 парциальных катодов и 36 сеток.

В процессе работы мы пришли к выводу, что технически реализуемая величина минимального зазора между сеткой и катодом $d_{с\text{-}к}$ при заданных конструктивных размерах составляет 0,36 мм (рис. 20).

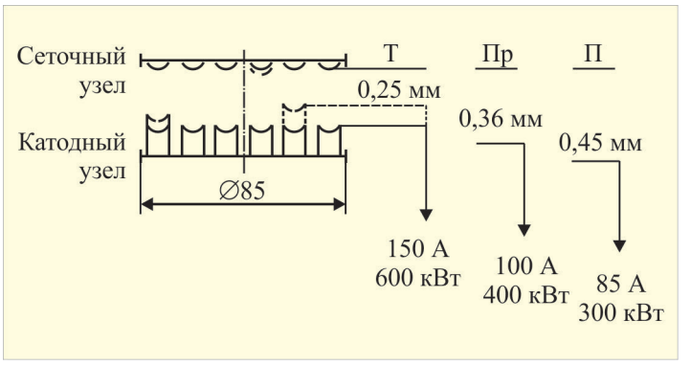


Рис. 20. Величина тока катода в зависимости от размера $d_{с\text{-}к}$

В зависимости от величины $d_{с\text{-}к}$ величина тока катода подчиняется закономерности $I_к = 1/d^n_{с\text{-}к}$, где $2 > n \geq 1$.

Катоды хороши с точки зрения химико-физических свойств, но конструктивно-технологические разбросы при изготовлении деталей и сборке КСУ приводят к разбросам допусков (см. рис. 20).

С учётом технологических разбросов по допускам отдельных катодов, образующих 36-катодный узел, реально достижимый ток не превышал значений 80…100 А.

Б. Технологическая: перегрев сеток, сеточные токи, приводящие к срыву работы сеточного модулятора.

Для получения заданных токов необходимо оптимальное напряжение накала 15…16 В (мощность накала при этом составляет 480 Вт, рис. 21). При таких напряжениях накала возникают термотоки сетки 30...40 мА, приводящие к нарушению работы сеточного модулятора. Первоначально мы работали при $U_н$ = 13 В, что соответственно уменьшало расчетный ток еще в 1,3 раза.

2(533).indd 44 23.06.2017 10:19:56

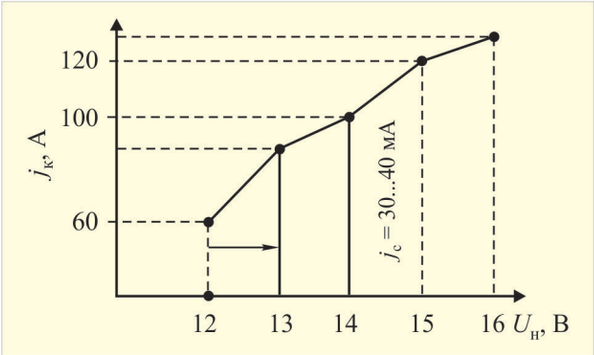


Рис. 21. Зона оптимальных значений напряжения накала
(размеры пушки ограничены возможностями технологического оборудования)

Можно было попытаться сбросить температуру посредством теплоотводящих экранов, но конструктивно в пушке их разместить не удается из-за ограниченных размеров керамики катодной ножки (130 мм), предельных для нашего технологического оборудования.

4.2. Новая конструкция сеток

Было принято решение увеличить тепловую и конструктивную прочность сеток, не потеряв существенно величину тока, при реально достигнутом зазоре 0,36 мм, что соответствует току порядка 100…120 А.

Однако такой КСУ обладает гораздо меньшей крутизной амплитудно-сеточной характеристики (рис. 22).

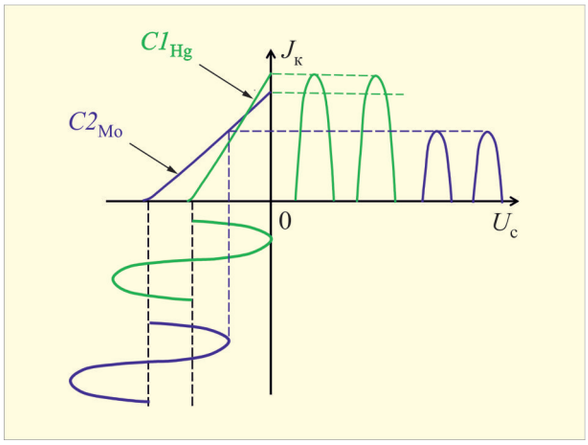


Рис. 22. Анодно-сеточная характеристика для старой ($C1_{Hf}$)
и новой ($C2_{Mo}$) конструкций сеток

Укрепление прочности сеток в итоге привело к уменьшению коэффициента усиления истронов и, как следствие, уменьшению выходной импульсной мощности.

4.3. Окончательное решение по КСУ

В результате проведенных испытаний было решено во входной лампе использовать сетки

2(533).indd 45 23.06.2017 10:19:56

первой конструкции, обладающие повышенной крутизной, а рабочее напряжение накала увеличить с 12 до 14…15 В, заменив материал сеток с молибдена на гафний.

При этом руководствовались разными механизмами возникновения сеточных токов при сетках из молибдена и из гафния.

Молибден для подавления эмиссии бария, осаждающегося на сетках, покрывается палладием. Однако при T = 800...850 °С палладий «устает» эффективно связывать барий. Возникают токи эмиссии.

Гафний при T > 900...950 °С «отвергает» от себя барий. Предполагалось сыграть на этом свойстве гафния, поднять температуру сеток посредством увеличения $U_н$ до 14…15 В и выйти на рабочую температуру гафния. Однако гафний отвергает барий, но сам начинает работать как слабый эмиттер, давая те же самые токи 30…40 мА.

К тому же, электросопротивление гафния в 6 раз больше, чем у молибдена, что приводит к дополнительному перегреву сеток при подаче большого СВЧ-сигнала в выходной лампе.

В результате принято решение:

1. Во входной лампе использовать сетки первой конструкции, обладающие повышенной крутизной. Увеличить рабочее напряжение накала с 13 до 14…15 В, заменив материал сеток с молибдена на гафний.

2. В выходной лампе использовать сетки новой конструкции, из молибдена, при напряжении накала катода также 15 В, за счет более теплостойкой конструкции сеток. В результате ток в выходной лампе составляет 100…120 А.

5. ВЫВОДЫ

1. Использование разных сеток во входной и выходной лампах позволяет работать с импульсным током порядка 100 А и обеспечить выходную импульсную мощность порядка 300 кВт.

2. Увеличение выходной импульсной мощности до 500…600 кВт при сохранении мгновенной полосы частот 20 % и коэффициента усиления цепочки до 32 дБ возможно при совершенствовании технологии, в том числе:

– при совершенствовании технологии изготовления крупногабаритных деталей из молибдена;

– при снижении рабочей температуры сеток и сеткодержателя, для чего необходимо освоить процесс нанесения на молибденовые держатели циркония, разработать процесс покрытия сеток из гафния тонким слоем (около 1 мкм) бора, разработать процесс нанесения антиэмиссионного покрытия на молибденовый сеткодержатель в целом, внедрить процесс нанесения твердого серебра на внутренние поверхности объемных резонаторов.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработано сложное комплексированное изделие, основанное на усилительной цепочке из двух мощных широкополосных многолучевых истронов. Основные параметры разработанного комплексированного изделия:

Центральная рабочая длина волны.....	1,5 м
Выходная импульсная мощность.....	300 кВт
Полоса рабочих частот.....	20 %
Коэффициент усиления.....	30 дБ

2(533).indd 46 23.06.2017 10:19:56

Перечисленные параметры в совокупности достаточно уникальны. Они получены в основном за счет использования нетрадиционных конструкций отдельных узлов прибора. Так, полоса рабочих частот 20 % достигается совокупностью большой электронной проводимости, создаваемой 36 лучами электронной пушки, и двухсвязанной резонаторной системы с двумя рабочими видами колебаний.

Входное согласующее устройство является комбинацией 36-лучевого емкостного катодно-сеточного зазора и трансформатора сопротивлений, образованного рядом сосредоточенных реактивностей.

Высоковольтная часть прибора развязана с резонаторной системой по высокому напряжению несколькими блокировочными конденсаторами, а во входном устройстве – с помощью трансформатора на длинных линиях.

Новым техническим решением для приборов О-типа с целью уменьшения габаритов при длине волны 1,5 м является введение коллектора как емкостной части активного резонатора в выходную резонаторную систему. Входной и выходной истроны, как и само название «истрон», защищены патентом РФ [8, 10].

ЛИТЕРАТУРА

1. **Galdetskiy, A. V.** TV IOT: achievements and prospects / A. V. Galdetskiy, A. N. Korolev // 16th International Crimean Microwave and Telecommunication Technology. – 2006. – Vol. 1. – P. 37 – 40.

2. **Loring, C.** The klystrode, a new high efficiency, high-power electron tube for UHF industrial applications / C. Loring, M. Shrader // J. Microw. Power Electromagn. Energy. – 1993. – Vol. 28, No 3.

3. **Shrader, M. B.** The 267 MHz high-power CW klystrode amplifier / M. B. Shrader, R. N. Tornoe // Int. J. High Speed Electron. Syst. – 1993. – Vol. 4, No 4.

4. **Galdetskiy, A. V.** Opportunity of gain and linearity increase in television IOT / A. V. Galdetskiy, A. N. Korolev // 15th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, CriMiCo'2005: Conference Proceedings. Crimea, 2005. – Vol. 1. – P. 195 – 196.

5. **Galdetskiy, A. V.** Influence of control grid geometry on structure of electron flow in multibeam IOT / A. V. Galdetskiy, L. I. Golenitskiy, N. G. Dukhina // 15th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, CriMiCo'2005: Conference Proceedings. Crimea, 2005. – Vol. 1. – P. 197 – 198.

6. **Galdetskiy, A. V.** On the prospects of increasing gain, efficiency and linearity of TV LOTs / A. V. Galdetskiy, A. N. Korolev // 2008 IEEE International Vacuum Electronics Conference, IVEC with 9th IEEE International Vacuum Electron Sources Conference, IVESC. Monterey, CA, 2008. – P. 447 – 448.

7. **Shrader, M. B.** High power CW Klystrode amplifier for 267 MHz / M. B. Shrader, D. H. Preist, R. N. Tornoe // Proceedings of the IEEE Particle Accelerator Conference. Washington, DC, USA, 1993. – Vol. 2. – P. 1103 – 1105.

8. **Пат. 2152102 РФ.** Электровакуумный прибор СВЧ, Истрон / М. И. Лопин, Т. А. Мишкин, А. С. Победоносцев, А. Н. Королев. – 27.06.2000.

9. **Королев, А. Н.** Опыт эксплуатации многолучевого клистрода (истрона) в телевизионном передатчике "Ильмень" / А. Н. Королев, М. И. Лопин, А. В. Бакуменко, Т. А. Мишкин, В. А. Рыжов // "625". – 2007. – № 3. – С. 1 – 8.

10. **Пат. 2518512 РФ.** Электровакуумный СВЧ-прибор гибридного типа "Истрон" / А. В. Галдецкий, Р. В. Грицук, М. И. Лопин, Т. А. Мишкин, В. А. Рыжов. – 09.04.2014.

11. **Лопин, М. И.** Устранение СВЧ-пробоев в выходной резонаторной системе мощного многолучевого клистрода – истрона / М. И. Лопин, Т. А. Мишкин, А. В. Галдецкий, М. Ф. Воскобойник, Р. В. Грицук, В. А. Рыжов // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2014. – № 4 (523). – С. 43 – 47.

2(533).indd 47 23.06.2017 10:19:56

12. **Sheikh, J. Y.** Operation of a high-power CW klystrode with the RFQ1 facility / J. Y. Sheikh et al. // Proceedings of the IEEE Particle Accelerator Conference. – 1993. – Vol. 2. – P. 1175.

13. **Rees, D. K.** Characterization of a klystrode as a RF source for high-average-power accelerators / D. K. Rees, W. Roybal and P. J. Tallerico // Proceedings of the IEEE Particle Accelerator Conference. – 1995.

14. **Karakkad, J. A.** Designing an electron gun for an efficient mobile ionospheric heating source / J. A. Karakkad, B. L. Beaudoin, J. C. Rodgers, G. S. Nusinovich, N. Goyal, T. M. Antonsen // IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC). – 2016. – P. 1 – 2.

15. **Beaudoin, B. L.** Novel high-power radio-frequency sources for ionospheric heating / B. L. Beaudoin, G. S. Nusinovich, C. Turner, J. A. Karakkad, A. H. Narayan, C. Thomson, T. M. Antonsen // IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC). – 2016. – P. 1 – 2.

16. **Сушков, А. Д.** Экспериментальное исследование гармоник тока в триод-клистроне (тристроне) / А. Д. Сушков, В. К. Федяев // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 1969. – Т. 12, № 1. – С. 69 – 71.

17. **Винокурова, И. В.** Кинематическая модель тристронного генератора сверхширокополосных импульсных сигналов / И. В. Винокурова, В. К. Федяев // Вестник РГРТУ. – 2010. – Т. 34, № 4. – С. 83 – 89.

18. **Федяев, В. К.** Тристрон – утроитель частоты / В. К. Федяев, В. Н. Козлов // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: материалы 15-й Междунар. Крымской конф. Севастополь, 2005. – С. 203 – 205.

19. **Корчагин, А. И.** Результаты математического моделирования двухзазорных резонаторов для мощных многолучевых клистродов, работающих в режиме умножения частоты / А. И. Корчагин, А. Ю. Мирошниченко, В. А. Царев // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2010. – Т. 4, № 3. – С. 61 – 65.

Статья поступила 22 февраля 2017 г.

2(533).indd 48 23.06.2017 10:19:57

УДК 621.385.73

ЭМИССИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОЛЕКУЛЯРНО-НАПЫЛЕННЫХ ОКСИДНЫХ КАТОДОВ В ЦИКЛОТРОННЫХ ЗАЩИТНЫХ УСТРОЙСТВАХ

Г. А. Жабин

АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино

Представлены результаты исследования влияния СВЧ-мощности на молекулярно-напыленные оксидные катоды малошумящих СВЧ-приборов, работа которых основана на циклотронном резонансе электронного потока. Показано, что подача СВЧ-мощности на вход прибора позволяет дополнительно активировать катод и стабилизировать его эмиссионные свойства в рабочем режиме.

КС: СВЧ-мощность, циклотронное защитное устройство (ЦЗУ), молекулярно-напыленный оксидный катод (МНОК), накальные характеристики, катодно-подогревательный узел (КПУ), активировка, магнитный электроразрядный насос (МЭН)

EMISSION CHARACTERISTICS OF MOLECULAR SPUTTER-DEPOSITED OXIDE CATHODES OPERATING IN CYCLOTRON PROTECTIVE DEVICES

G. A. Zhabin

JSC «RPC «Istok» named after Shokin», Fryazino

The article presents the results of research of microwave energy power influence on molecular sputter-deposited oxide cathodes of low noise microwave devices, which are based on the cyclotron resonance of the electron flow. It is shown that the supply of microwave power to the input device can further activate the cathode and to stabilize the emission after poisoning the cathode in operating mode.

Keywords: microwave energy, cyclotron protective device, molecular sputter-deposited oxide cathode, emission characteristics, cathode-heating unit, activation, magnetic discharge pump

1. ВВЕДЕНИЕ

В приемных каналах современных РЛС необходимо обеспечить малый коэффициент шума (порядка 2…3 дБ), достаточный коэффициент усиления, устойчивость к мощным импульсным СВЧ-перегрузкам на входе приемных каналов, широкий динамический диапазон, амплитудную и фазовую линейность и стабильность коэффициента усиления. Этим требованиям в значительной мере удовлетворяют ЦЗУ, разработанные и созданные в АО «НПП «Исток» им. Шокина» [1]. В этих приборах используются молекулярно-напыленные оксидные катоды (МНОК) с толщиной оксидного слоя 0,8…1 мкм. При этом с эмиссионной поверхности размерами 0,02×0,7 мм плотность отбираемого тока эмиссии составляет 3…5 А/см^2 при температуре 850…950 ºС и долговечности несколько тысяч часов. Ленточный электронный поток является наиболее оптимальным для использования в ЦЗУ, так как позволяет уменьшить величину электронного зазора, обеспечивая полное прохождение электронного потока на коллектор.

2(533).indd 49 23.06.2017 10:19:57

2. НАНЕСЕНИЕ ЭМИССИОННОГО ПОКРЫТИЯ В ВАКУУМЕ НА КЕРН КАТОДА

В отличие от стандартного оксидного катода, получаемого пульверизацией, катафорезом и другими способами, который имеет плотность покрытия 2,8…3 г/см^3 и шероховатость 2…3 мкм, в МНОК эмиссионное покрытие, получаемое ионно-плазменным методом, имеет плотность 3,9…4,5 г/см^3 [2]. Молекулярно-напыленные оксидные покрытия обладают высокой гладкостью поверхности, высокой эмиссионной однородностью, хорошим сцеплением с керном катода и отсутствием в покрытии органического вещества связки – биндера.

Процесс нанесения покрытий в вакууме ионно-плазменным методом зависит от многих параметров напыления и качества оксидной мишени, с которой происходит распыление состава. Нанесение покрытий на керны прямонакальных катодов из сплава ВР-20 осуществлялось с помощью лабораторной установки ионно-плазменного распыления, откачиваемой турбомолекулярным насосом ВМН-500. Корпус вакуумной камеры снабжен рубашкой водяного охлаждения. Напыление катодов происходило в рабочей смеси газов аргона и двуокиси углерода. В процессе напыления ионизация газов в рабочем объеме вакуумной камеры осуществляется электронами, эмитированными с катода-мишени. Покрытие катода-мишени состоит из тройного карбоната состава $(BaSrCa)CO_3$, нанесенного методом пульверизации. После термического разложения в вакууме карбонатов мишени осуществлялся напуск рабочей смеси газа. Для увеличения плотности плазмы использовалось магнитное поле напряженностью 70 Э. Процесс распыления активного вещества в установке осуществляется при бомбардировке мишени атомами ионизированных газов. Рабочее давление в камере при распылении мишени составляло $(7{,}5…8)\cdot10^{-4}$ мм рт. ст.

Толщина эмиссионного покрытия на катодах, полученная распылением мишени, составила 0,8…1 мкм. Скорость нанесения покрытия на поверхность керна в существующей конструкции – 55…60 Å/мин.

Покрытие МНОК является устойчивой на воздухе смесью карбонатов и окислов с соотношением щелочно-земельных металлов: Ba – 47 %, Sr – 43 %, Ca – 10 %.

3. УСТАНОВКА КАТОДОВ В ПРИБОР, ОТКАЧКА И ПРОВЕДЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ

Катоды с нанесенными эмиссионными покрытиями устанавливались в катодно-подогревательные узлы (КПУ) электровакуумных приборов (ЭВП) и после операции заварки корпуса аргонно-дуговой сваркой поступали на откачной пост.

Процесс откачки длится около 10 ч и предусматривает: ступенчатый прогрев прибора в течение нескольких часов до температуры 400 ºС; выдержку при данной температуре в течение 4 ч; последующее снижение температуры прибора до 200 ºС; проведение активировки катода и обезгаживание геттера. Отпаивание ЭВП с откачного поста производится при температуре 200 ºС. Вакуум в откачной системе при этом не должен быть хуже $3\cdot10^{-8}$ мм рт. ст.

Во время откачки, несмотря на длительное время обезгаживания ЭВП, не всегда удается получить требуемую величину давления остаточных газов, так как при снижении температуры ЭВП могут происходить обратный поток из элементов вакуумной системы откачного поста и сорбция газов внутренней оболочкой прибора.

После процесса откачки ЭВП поступали на стенд тренировки и прогона. На тренировочном стенде в статическом режиме снимались накальные характеристики (рис. 1), по которым, с учетом рабочей температуры катода, устанавливались рабочие токи накала $I_{н.раб}$.

2(533).indd 50 23.06.2017 10:19:57

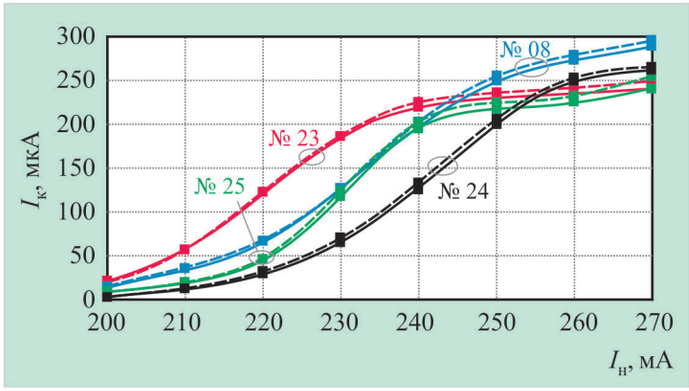


Рис. 1. Зависимости тока катода ЦЗУ от тока накала во время тренировки МНОК: сплошные линии – накальные характеристики, снятые до подачи СВЧ-мощности на вход прибора; пунктирные – после подачи СВЧ-мощности и до достижения стабильного тока эмиссии

Значения рабочих токов накала при соответствующих температурах катодов для каждой накальной характеристики приведены в таблице.

Номер прибора	$I_{н.раб}$, мА	$T_к$, °С
08	250	586
23	240	554
25	250	590
24	255	604

После тренировки приборов в течение 50 ч на вход ЦЗУ подавалась повышенная СВЧ-мощность при включенном рабочем режиме прибора. При этом электронный луч, проходя через входной и выходной резонаторы, оседал в коллекторе. В приборах № 08 и 23 подавалась СВЧ-энергия в импульсном режиме; мощность $P_и$ = 32 Вт, скважность Q = 20, длительность импульса $t_{имп}$ = 40 мкс. В приборах № 24 и 25 на вход резонатора подавалось СВЧ-излучение мощностью 10 Вт в непрерывном режиме.

Из рис. 2 видно, что при подаче СВЧ-мощности на вход резонаторов в приборах происходит резкое падение тока эмиссии катода, который постепенно восстанавливается в течение 80…130 мин. Повышение тока накала ускоряет процесс восстановления эмиссии. После восстановления эмиссии вновь снимались накальные характеристики данных катодов. В накальных характеристиках, построенных по результатам измерений после воздействия СВЧ-мощности, заметен сдвиг влево по отношению к перво-

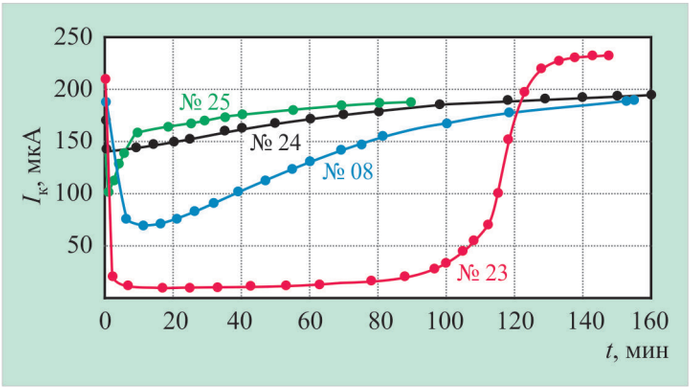


Рис. 2. Зависимости тока катода ЦЗУ от времени при подаче входной СВЧ-мощности

2(533).indd 51 23.06.2017 10:19:57

начальным значениям, падения эмиссии не происходило. В ЭВП, который после воздействия повышенной СВЧ-мощности был поставлен на длительный прогон в рабочем режиме, отмечена более высокая стабильность тока катода в приборе № 4 (рис. 3). Испытания на долговечность продолжаются и составляют на данный момент 2500 ч.

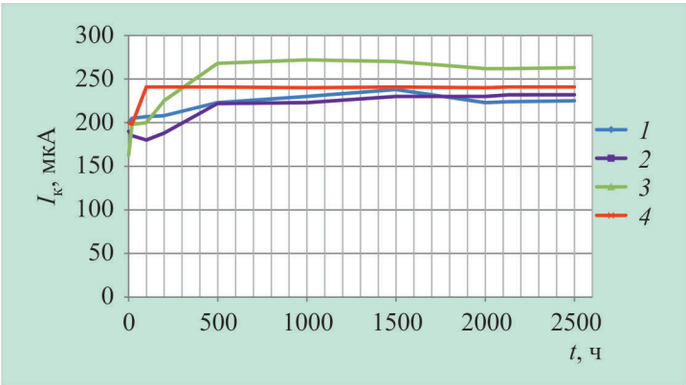


Рис. 3. Зависимости тока катода ЦЗУ от долговечности:
№ 1…3 – без тренировки СВЧ-мощностью; № 4 – с тренировкой СВЧ-мощностью

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Начальная активировка катода в ЭВП происходит уже на этапе окончания откачки прибора, когда катод нагревают до температуры около 1000 К. Во время процесса откачки ЭВП осуществляется удаление газов CO, CO_2, O_2, CH_4 [3]. В [4] показано, что на этапах активирования оксидного катода в покрытии находятся квазисвободные ионы кислорода, которые перемещаются по поверхности зерен оксида за счет диффузии с энергией активации около 0,6 эВ при воздействии электрического поля.

После активировки катода большая часть квазисвободных ионов кислорода удаляется из оксидного покрытия. Часть из них сорбируется стенками внутренней оболочки прибора, электродами, геттером. Отпаянный ЭВП является сложной динамически развивающейся системой процессов поглощения и выделения газов. При подаче СВЧ-мощности во входной резонатор происходит электронная бомбардировка внутренних стенок прибора, а также вторичная электронная эмиссия. В результате этих процессов имеет место десорбция молекул кислорода и других газов и их ионизация. Катод, являясь наиболее обезгаженным элементом прибора, сильно поглощает газы. Положительные ионы с внутренней оболочки и электродов осаждаются на химически активную поверхность катода и вызывают изменение поверхностных доноров, ответственных за эмиссию, вследствие этого происходит резкое падение эмиссии. Если ток накала не выключается, то постепенно происходит активировка – восстановление бария на поверхности катода, уход сорбированных ионов из слоя. С увеличением СВЧ-мощности интенсивность электронной бомбардировки и соответственно отравления катода возрастают. Это коррелирует с глубиной падения тока при подаче СВЧ-сигнала мощностью 32 и 10 Вт. На скорость отравления катода влияют также степень предварительной термической обработки и очистки поверхностей внутри прибора и вакуумные условия в приборе. Из таблицы и рис. 2 следует, что чем большую рабочую температуру имеет катод прибора, тем с меньшей скоростью будет происходить его отравление и тем быстрее он восстановится. В то же время известно, что

2(533).indd 52 23.06.2017 10:19:58

с увеличением температуры катода в ЭВП уменьшается его долговечность, а значит, и работоспособность всего прибора из-за увеличения скорости испарения оксидного покрытия.

При повторной подаче повышенной СВЧ-мощности на вход ЦЗУ после восстановления и стабилизации эмиссии МНОК, ухудшения эмиссионных характеристик уже не наблюдалось.

В настоящее время идет технологическая отработка оптимального уровня мощности СВЧ-энергии, которую необходимо подавать на входной резонатор для стабилизации эмиссионных характеристик МНОК.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные экспериментальные результаты позволяют предложить способ дополнительной очистки внутренней поверхности ЦЗУ и стабилизации эмиссии путем подачи СВЧ-мощности в процессе тренировки (и, возможно, откачки). При этом в ЦЗУ необходимо использовать магнитный электроразрядный насос для удаления десорбированных ионов из прибора. Описанные выше эффекты изменения тока эмиссии МНОК при подаче СВЧ-мощности на вход ЦЗУ необходимо учитывать в производственном процессе изготовления СВЧ-приборов. Несомненно, с учетом полученных данных, требуется дальнейшее изучение рассмотренных физико-химических процессов и явлений в ЦЗУ, проведение ряда дополнительных экспериментов, совершенствование и отработка технологии.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Будзинский, Ю. А.** Становление, развитие и перспективы СВЧ-приборов на циклотронном резонансе электронного потока / Ю. А. Будзинский, С. В. Быковский, И. И. Голеницкий, В. Г. Калина // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. Труды юбилейной конференции, посвященной 70-летию ФГУП «НПП «Исток». Ч. 1. – 2013. – Вып. 3 (518). – С. 136 – 141.

2. **Дружинин, А. В.** Новый эффективный термокатод / А. В. Дружинин, Ю. А. Кондрашенков // Радиотехника и электроника. – 1973. – Т. 18, № 7. – С. 15 – 31.

3. **Черепнин, Н. В.** Основы очистки, обезгаживания и откачки в вакуумной технике / Н. В. Черепнин. – М.: Советское радио, 1967.

4. **Дудкин, В. Н.** Влияние электропереноса ионов на термоэлектронную эмиссию и электропроводность оксидного катода / В. Н. Дудкин, А. Б. Киселев, В. Г. Ворожейкин // Изв. АН СССР. Сер. Физ. – 1974. – Т. 38, № 2. – С. 402 – 406.

Статья поступила 14 апреля 2017 г.

2(533).indd 53 23.06.2017 10:19:58

ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.3.049.77.029.64

НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ МОЩНЫХ УСИЛИТЕЛЬНЫХ ГМИС *X*-ДИАПАЗОНА НА АЛМАЗНОЙ ПЛАТЕ И НИТРИДГАЛЛИЕВЫХ ТРАНЗИСТОРАХ

А. М. Темнов, К. В. Дудинов, А. М. Емельянов,
А. А. Воронин, Д. А. Катков, И. А. Рогачев, О. И. Мешков

АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино

Изготовлены и исследованы мощные усилительные ГМИС СВЧ нового поколения, работающие в *X*-диапазоне. ГМИС изготовлены на лицевой стороне единой алмазной платы, при этом все пассивные элементы схемы изготовлены монолитно, а кристаллы мощных нитридгаллиевых транзисторов смонтированы на поверхность платы и соединены с ее контактными площадками с помощью золотой проволоки. Обратная сторона алмазной платы имеет заземляющую металлизацию, а в объеме платы выполнены металлизированные отверстия для заземления контактов лицевой стороны. Спланирован и проведен полный факторный эксперимент и найдены оптимальные технологические режимы травления отверстий в алмазной плате с помощью установки реактивного ионного травления Corial 200IL. Показано, что ГМИС СВЧ, изготовленные на единой алмазной плате, имеют коэффициент усиления, выходную мощность и КПД, сравнимые с аналогичными параметрами ГМИС мозаичной конструкции. При этом конструкция ГМИС упрощается, улучшаются массогабаритные характеристики, обеспечивается точность и воспроизводимость монтажно-сборочных работ.

КС: мощный усилительный ГМИС СВЧ, X-диапазон, алмазная плата, нитридгаллиевый транзистор

A NEW GENERATION OF *X*-BAND HIGH-POWER AMPLIFYING HMICs ON A DIAMOND BOARD AND GALLIUM NITRIDE TRANSISTORS

A. M. Temnov, K. V. Dudinov, A. M. Yemelyanov,
A. A. Voronin, D. A. Katkov, I. A. Rogachev, O. I. Meshkov

JSC «RPC «Istok» named after Shokin», Fryazino

High-power microwave amplifying HMICs of a new generation working in *X*-band have been manufactured and studied. HMICs are made on the front face of one diamond board, with all passive elements of the circuit being manufactured monolithically, and the chips of high-power gallium nitride transistors being assembled on the board surface and connected to its pads with gold wire. The diamond board backside has grounding metallization and there are metalized holes for front face contacts grounding in the board volume. A complete factorial experiment has been planned and conducted, and optimal technological hole etching modes in the diamond board have been found out using reactive ion-etching installation Corial 200IL. It is shown that microwave HMICs made on one diamond board have gain, output power and efficiency comparable to HMIC similar parameters of mosaic structure. In this case HMIC structure is simplified, weight-size characteristics are improved, accuracy and repeatability of field-assembly operations are provided.

Keywords: high-power microwave amplifying HMIC, X-band, diamond board, gallium-nitride transistor

2(533).indd 54 23.06.2017 10:19:58

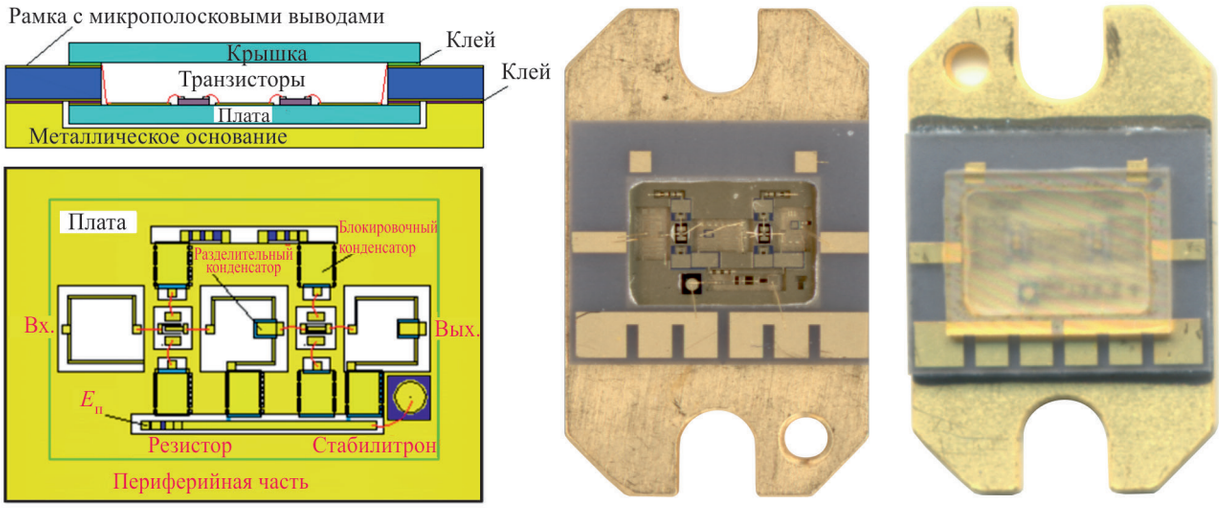
1. ВВЕДЕНИЕ

В работах [1, 2] исследованы три конструктивно-технологических решения ГМИС СВЧ, определяющие, в конечном счете, их СВЧ-параметры, степень миниатюризации, надежность и стоимость.

Первое конструктивно-технологическое решение

Базовая конструкция ГМИС СВЧ, которую предложил в 1978 г. Темнов А. М., защищена авторским свидетельством СССР [3].

В 1985 г. была закончена первая работа по созданию двухкаскадного малошумящего усилителя (МШУ) 3-см диапазона на полевых GaAs-транзисторах с коэффициентом усиления 15 дБ и коэффициентом шума 3 дБ. Этот усилитель выпускается до настоящего времени [4]. Базовая конструкция ГМИС СВЧ на примере этого МШУ (модуль М421156) приведена на рис 1.



а) *б*) *в*)

Рис. 1. Базовая конструкция ГМИС СВЧ (*а*),
МШУ М421156 без крышки (*б*) и с крышкой (*в*)

Из рис. 1, *а* видно, что конструктивно ГМИС СВЧ выполняется на единой диэлектрической плате из монокристаллического лейкосапфира. При этом вся пассивная часть схемы усилителя, содержащая пассивные элементы: резисторы, конденсаторы, индуктивные элементы в виде отрезков линий и контактные площадки, выполнена монолитно на одной стороне изолирующей платы, а активные навесные компоненты (кристаллы GaAs полевых СВЧ-транзисторов и кремниевый защитный стабилитрон) монтируются на плату. Стабилитрон необходим для защиты усилителя от перенапряжения и статического электричества. Стержневым вопросом при поиске конструктивного решения ГМИС СВЧ был способ заземления. В базовой конструкции этот вопрос решен за счет применения копланарной линии, при этом вся схема располагается в центральной части платы, а периферийная часть платы служит для ее обращенного монтажа в корпус. В качестве корпуса используется керамическая рамка с центральным отверстием и микрополосковыми выводами. Использование обращенного монтажа позволяет непосредствен-

2(533).indd 55 23.06.2017 10:19:59

но соединить «землю» ГМИС с «землей» корпуса и исключить проволочные соединения. Проволочные проводники используются только для соединения питающих и сигнальных выводов ГМИС с микрополосковыми выводами корпуса. Для улучшения отвода тепла от ГМИС она устанавливается на металлическое основание. При этом между основанием и подложкой остается технологический зазор, обеспечивающий возможность применения подложек разной толщины. В начале 80-х годов сапфир был в дефиците, для изготовления ГМИС применялись осколки сапфировых пластин с разбросом по толщине от 0,1 до 0,45 мм, большим прогибом и дефектами на поверхности. В базовой конструкции платы ГМИС отпадает необходимость металлизации обратной стороны платы, а расположение всех элементов на одной стороне платы позволяет наиболее полно использовать возможности литографии, планарной технологии и группового способа изготовления, при этом существенно улучшаются массогабаритные характеристики, СВЧ-параметры, надежность и уменьшается стоимость изготовления ГМИС. На основе базовой конструкции и базовой технологии были разработаны и изготовлены усилительные и преобразовательные ГМИС диапазона 0,3…18 ГГц для различных систем радиоэлектронного вооружения, создан и внедрен в производство функционально полный ряд уникальных по комплексу параметров ГМИС СВЧ-диапазона на полевых GaAs-транзисторах [5]. На рис. 2 показаны внешний вид и конструкции этих ГМИС СВЧ.

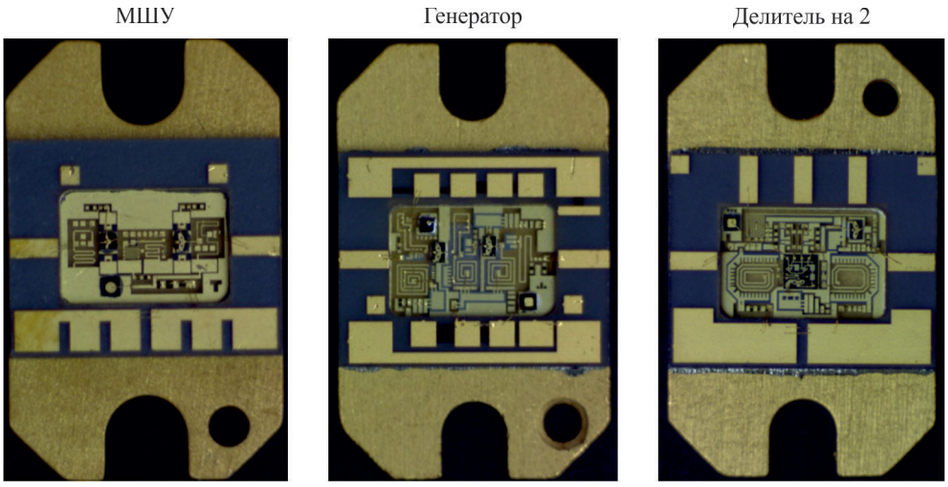


Рис. 2. ГМИС СВЧ базовой конструкции
и технологии изготовления

Вышеперечисленные ГМИС СВЧ имеют одинаковые габаритные размеры и контактные площадки. Для измерения их СВЧ-параметров используется контактное устройство производства АО «НПП «Исток» им. Шокина» с переходом коаксиал-микрополосок, обеспечивающее механический контакт с микрополосковыми СВЧ-выводами ГМИС, расположенными на керамической рамке. Для подачи питания на ГМИС используются игольчатые зонды, входящие в состав контактного устройства, через которые питание подается непосредственно на выводы питания, расположенные на керамической рамке. Для измерения НЧ-параметров и испытаний ГМИС СВЧ на внешние воздействующие факторы создана универсальная оснастка. Это обеспечило возможность изготовления большого количества типов ГМИС СВЧ (более 100 типов) на ограниченном количестве оборудования.

Основными недостатками базового конструктивно-технологического решения ГМИС СВЧ

2(533).indd 56 23.06.2017 10:19:59

являются невысокая допустимая мощность рассеивания (не более 300 мВт) из-за низкой теплопроводности платы из лейкосапфира и выходная мощность до 100 мВт.

Второе конструктивно-технологическое решение ГМИС СВЧ

Для получения выходной мощности более 100 мВт и улучшения отвода тепла от транзисторов предполагалось сделать в плате отверстия и монтировать полевые GaAs-транзисторы непосредственно на металлическое основание. Однако сделать отверстия в лейкосапфире в 80-е годы было большой проблемой, и поэтому для увеличения выходной мощности электрическую схему ГМИС СВЧ разбивали на фрагменты и изготавливали каждый фрагмент на отдельной плате. Вместо одной появилось несколько плат, содержащих пассивные элементы схемы. Все платы, диоды и транзисторы устанавливали непосредственно на металлическое основание, в окно керамической рамки с микрополосковыми выводами, и соединяли в единую электрическую схему с помощью золотых проволочных проводников. Такая конструкция увеличила количество проволочных проводников, сложность и трудоемкость изготовления, но позволила повысить выходную мощность ГМИС СВЧ. При этом габаритно-присоединительные размеры у этих ГМИС СВЧ соответствовали базовой конструкции, поэтому для измерения их параметров и испытаний использовали уже имеющиеся стенды и оправки. Конструкции, состоящие из нескольких компонентов, расположенных в одном корпусе и объединенных в единую схему проволочными проводниками, изготавливаются в России и за рубежом и получили название «мозаичные схемы». В результате расширился ряд аналоговых схем и создан ряд дискретных ГМИС СВЧ (переключатели, аттенюаторы, фазовращатели). Примеры ГМИС мозаичной конструкции приведены на рис 3.

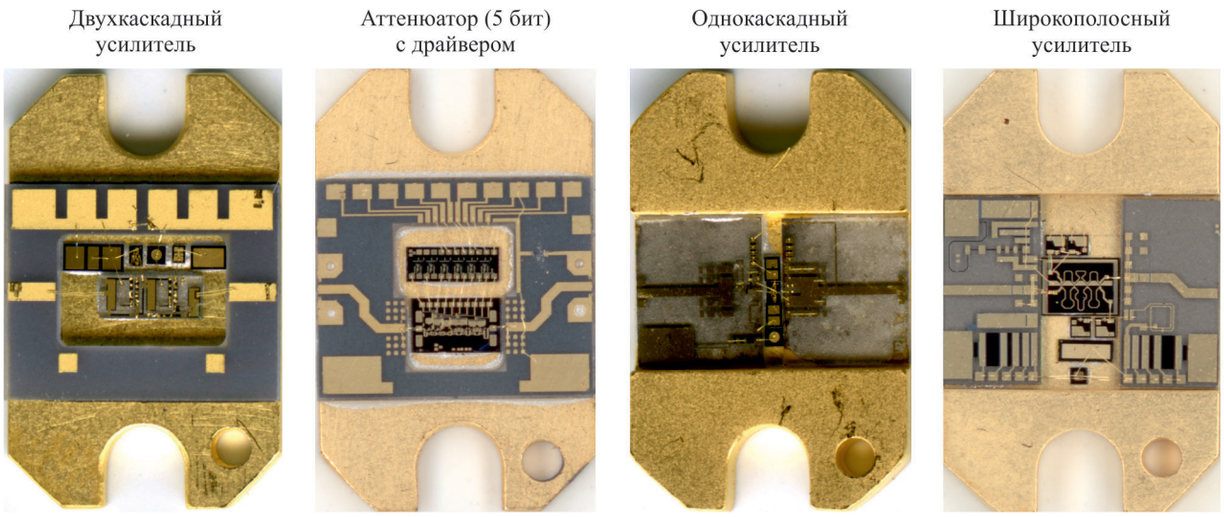


Рис. 3. ГМИС СВЧ мозаичной конструкции

Конструкции ГМИС СВЧ (см. рис. 3) показывают, что их развитие, затянувшееся на 30 лет и продолжающееся сейчас, с одной стороны, идет по пути усложнения схемы и увеличения числа компонентов, а с другой – повышения степени интеграции, в том числе за счет применения МИС СВЧ.

2(533).indd 57 23.06.2017 10:20:00

Третье конструктивно-технологическое решение ГМИС СВЧ

Стремление к миниатюризации ГМИС СВЧ было и остается важной задачей их развития. В базовой конструкции ГМИС СВЧ, показанной на рис. 1, имеется четыре основных компонента: основание, рамка с микрополосковыми выводами и окном, плата, расположенная в окне, и крышка для герметизации. На пути миниатюризации ГМИС СВЧ использован опыт разработки и измерения параметров МИС СВЧ. С учетом этого опыта, анализ конструкции ГМИС СВЧ показал, что для уменьшения их массы и габаритов и приближения к МИС СВЧ необходимо: исключить из конструкции ГМИС СВЧ рамку с отверстием, при этом занимаемая площадь сократится до размеров окна рамки 4,5×3 мм; использовать для измерения параметров ГМИС СВЧ такие же зонды, как и для измерения параметров МИС СВЧ; традиционное металлическое основание выполнить из алмаза, чтобы уменьшить массу (масса алмаза в 2,5 раза меньше, чем у меди); улучшить теплоотвод (теплопроводность алмаза в 4 раза выше, чем у меди).

Первая конструкция миниатюрной ГМИС СВЧ – это двухкаскадный предварительный усилитель мощности (ПУМ) на частоту 10 ГГц с коэффициентом усиления 15 дБ и выходной мощностью 0,7 Вт.

Переход к существующей конструкции ПУМ проходил постепенно. На первом этапе миниатюризации ПУМ размещался на металлическом основании и выполнялся на двух арсенид-галлиевых полевых СВЧ-транзисторах. В настоящее время ПУМ размещается на алмазном основании и содержит монолитный однокаскадный усилитель М421304-2 на входе и выходной каскад на GaAs полевом СВЧ-транзисторе.

На рис. 4 приведены внешний вид и конструкция ПУМ на металлическом основании размерами 3,5×3 мм и толщиной 0,8 мм, а также алмазном металлизированном основании размерами 3,5×3 мм и толщиной 0,2 мм.

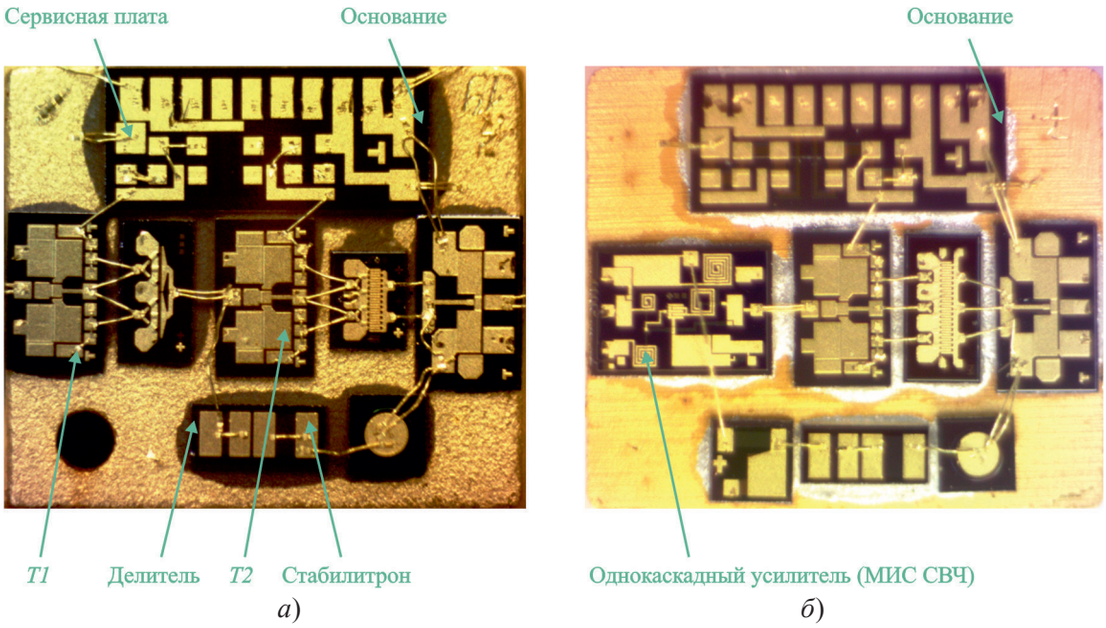


Рис. 4. Первый гибридно-монолитный миниатюрный двухкаскадный усилитель мощности *X*-диапазона на металлическом (*а*) и на алмазном основании (*б*)

2(533).indd 58 23.06.2017 10:20:00

Отличительной особенностью конструкции усилителя мощности на алмазном основании (см. рис. 4, *б*) является монолитный однокаскадный усилитель М421304-2 на входе. Все транзисторы и МИС СВЧ отечественного производства, выполнены на GaAs, выпускаются в АО «НПП «Исток» им. Шокина». Для измерения параметров миниатюрного ГМИС-усилителя мощности СВЧ используются зонды СВЧ и НЧ [6, 7], как и для измерения параметров МИС СВЧ. Ниже приведена фотография миниатюрного ГМИС-усилителя мощности с зондами для измерения параметров.

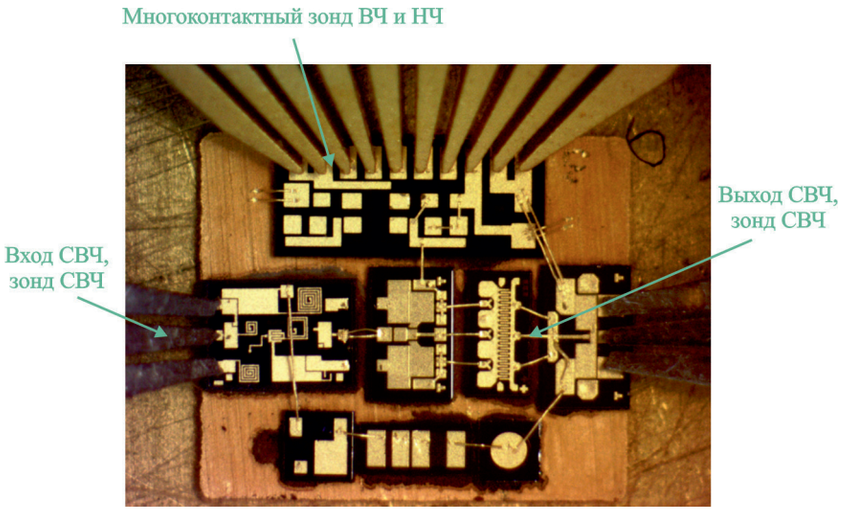


Рис. 5. Двухкаскадный миниатюрный усилитель мощности на частоту 10 ГГц с коэффициентом усиления 15 дБ и выходной мощностью 0,7 Вт

Из рис. 5 видно, что все компоненты усилителя размещены на едином алмазном основании размерами 3,5×3 мм, толщиной 0,2 мм. Копланарные СВЧ-зонды расположены соосно и контактируют с входом и выходом усилителя мощности СВЧ, а многоконтактный зонд ВЧ и НЧ контактирует одновременно к 10 площадкам сервисной платы размерами 0,12×0,25 мм, содержащей резистивный делитель для регулировки оптимального напряжения смещения на затворе транзистора, контактные площадки и соединительные линии. Все вышеперечисленные ГМИС СВЧ в настоящее время востребованы и выпускаются на «НПП «Исток».

Разработанные ГМИС и МИС СВЧ широко внедрены в радиоэлектронную аппаратуру, выпускаемую нашим и другими предприятиями отрасли. АО «НПП «Исток» им. Шокина» выпускает более 100 000 ГМИС СВЧ в год.

Исследование мощных ГМИС СВЧ на GaN-транзисторах

Авторами были исследованы мощные ГМИС СВЧ мозаичной конструкции и на алмазных основаниях. ГМИС СВЧ изготавливались на GaN-транзисторах типа TGF2023-1, TGF2023-2, TGF2023-5 фирмы TriQiunt. Электрическая схема однокаскадного усилителя приведена на рис. 6.

ГМИС СВЧ имеет мозаичную конструкцию. Все компоненты расположены на плоскости золоченого металлического основания размерами 7,5×12×1 мм, служащего теплоотводом. На металлическое основание припаяна рамка размерами 7,5×6×0,5 мм с микрополосковыми выводами входа и выхода, имеющими волновое сопротивление 50 Ом. В рамке имеется окно

2(533).indd 59 23.06.2017 10:20:01

размерами 4,5×3 мм. Для подачи питания на рамке расположены контактные площадки. В окне рамки, непосредственно на поверхности металлического основания, размещены транзистор TGF2023-1, согласующие платы входа и выхода и блокировочные конденсаторы. Развязывающие конденсаторы по входу и выходу расположены непосредственно на согласующих платах.

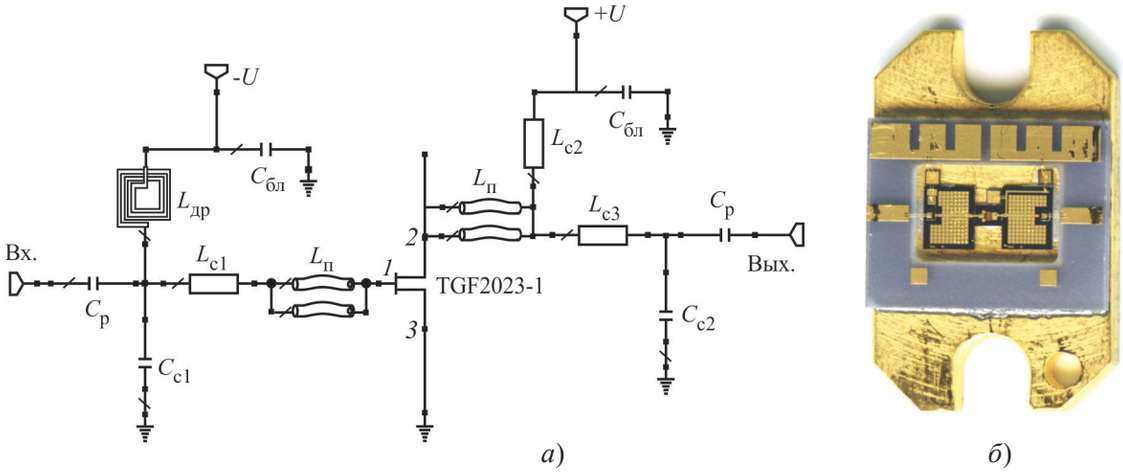


Рис. 6. Электрическая схема (*а*) и внешний вид однокаскадного усилителя мощности на рабочую частоту 10 ГГц и его согласующих плат на входе и выходе (*б*)

На рис. 7 приведены измеренные характеристики однокаскадного усилителя на транзисторе TGF2023-1 в диапазоне частот 8…12 ГГц.

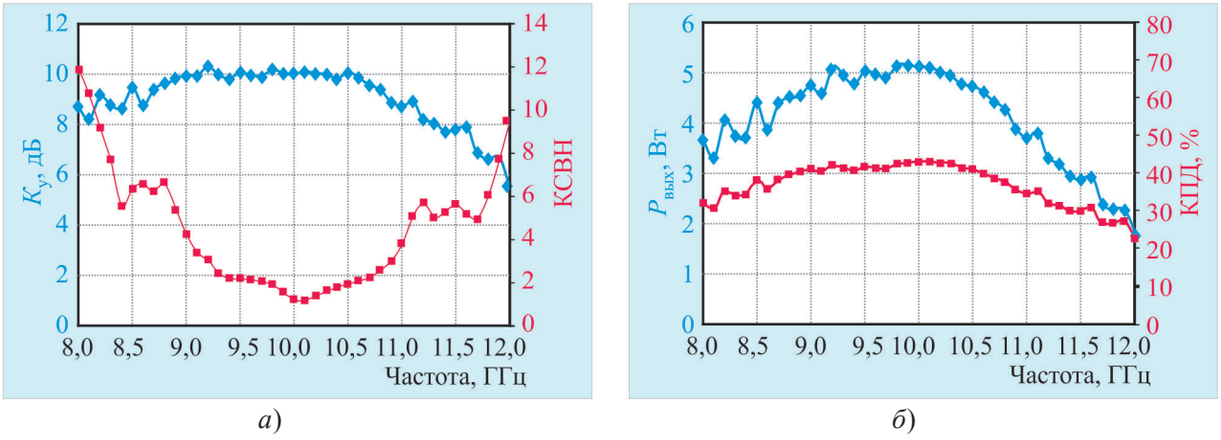
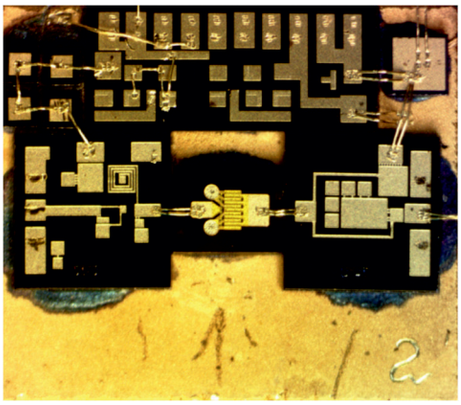


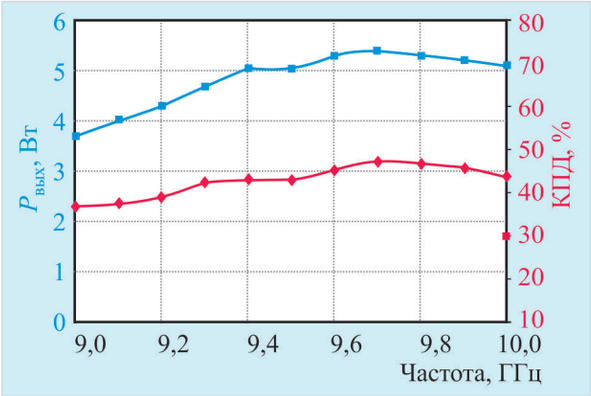
Рис. 7. Зависимости коэффициента усиления и КСВН (*а*), а также выходной мощности и КПД (*б*) от рабочей частоты при входной мощности 0,5 Вт

Исследованы также мощные миниатюрные однокаскадные усилители *X*-диапазона на нитридгаллиевых транзисторах TGF2023-1, TGF2023-2 и TGF2023-5 с выходной мощностью 5, 10 и 17 Вт соответственно. Конструктивно усилители изготовлены в миниатюрном гибридно-монолитном исполнении на распределенных и сосредоточенных элементах. На рис. 8 приведены внешний вид однокаскадного усилителя мощности на транзисторе TGF2023-1 и его параметры в диапазоне частот 8…10 ГГц при входной мощности 0,5 Вт.

2(533).indd 60 23.06.2017 10:20:01



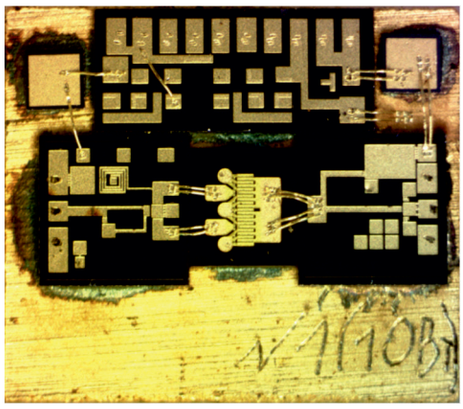
а)



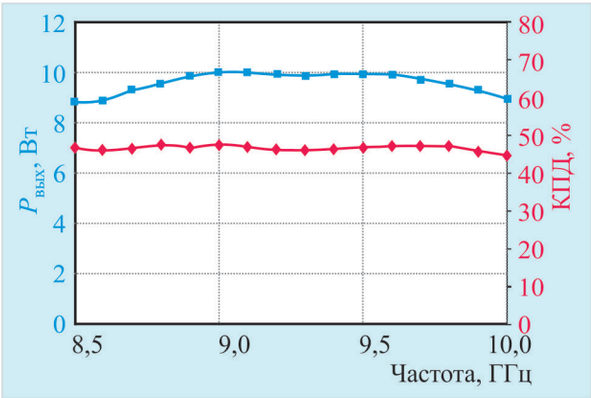
б)

Рис. 8. Конструкция миниатюрной ГМИС однокаскадного усилителя мощности на транзисторе TGF2023-1 с частотой 8…10 ГГц, выходной мощностью 5 Вт (*а*) и зависимости выходной мощности и КПД однокаскадного усилителя на транзисторе TGF2023-1 в диапазоне частот при входной мощности 0,5 Вт (*б*)

На рис. 9 приведены внешний вид однокаскадного усилителя мощности на транзисторе TGF2023-2 и его параметры в диапазоне частот 8,5…10 ГГц при входной мощности 1 Вт.



а)



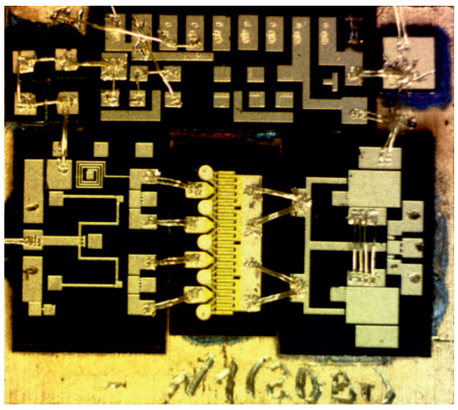
б)

Рис. 9. Конструкция однокаскадного усилителя мощности на транзисторе TGF2023-2 с частотой 8,5…10 ГГц, выходной мощностью 10 Вт (*а*) и зависимости выходной мощности и КПД однокаскадного усилителя на транзисторе TGF2023-2 в диапазоне частот при входной мощности 1 Вт (*б*)

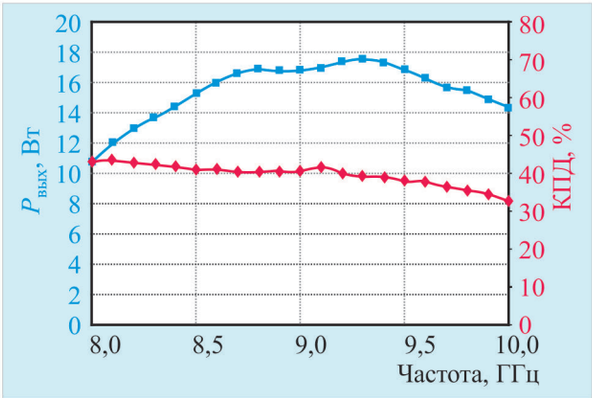
На рис. 10 приведены внешний вид однокаскадного усилителя мощности на транзисторе TGF2023-5 и его параметры в диапазоне частот 8…10 ГГц при входной мощности 2 Вт.

Анализ трех известных конструктивно-технологических решений ГМИС СВЧ показывает, что они обеспечивают создание функционально полного ряда уникальных по комплексу параметров ГМИС СВЧ диапазона 0,3…18 ГГц на полевых GaAs- и GaN-транзисторах. Вместе с тем основными недостатками ГМИС СВЧ являются: невозможность размещения на плате ГМИС СВЧ мощных компонентов (кристаллов диодов, транзисторов и МИС СВЧ); большое количество плат в одной мозаичной ГМИС СВЧ; большое число проволочных соединений; высокая трудоемкость монтажно-сборочных работ.

2(533).indd 61 23.06.2017 10:20:02



а)



б)

Рис. 10. Конструкция однокаскадного усилителя мощности на транзисторе TGF2023-5 с частотой 8…10 ГГц, выходной мощностью 17 Вт (*а*) и зависимости выходной мощности и КПД однокаскадного усилителя на транзисторе TGF2023-5 в диапазоне частот при входной мощности 2 Вт (*б*)

Для устранения вышеперечисленных недостатков назрела острая необходимость совершенствования конструкции ГМИС СВЧ, поиска новых конструктивно-технологических решений для создания мощных ГМИС СВЧ при одновременном увеличении объемов производства и уменьшении их стоимости.

2. КОНСТРУКЦИЯ МОЩНЫХ ГМИС СВЧ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Для преодоления вышеперечисленных недостатков, присущих известным конструкциям ГМИС, конструктивное решение для нового поколения мощных ГМИС СВЧ должно обеспечить размещение на лицевой стороне единой диэлектрической платы всех пассивных элементов схемы и кристаллов диодов, транзисторов и МИС. При этом все пассивные элементы схемы выполняются монолитно, а кристаллы смонтированы на поверхность платы и соединены с ее контактными площадками с помощью золотой проволоки. Обратная сторона платы должна иметь заземляющую металлизацию, а в объеме платы выполняются металлизированные отверстия для заземления контактов лицевой стороны с ее обратной стороной.

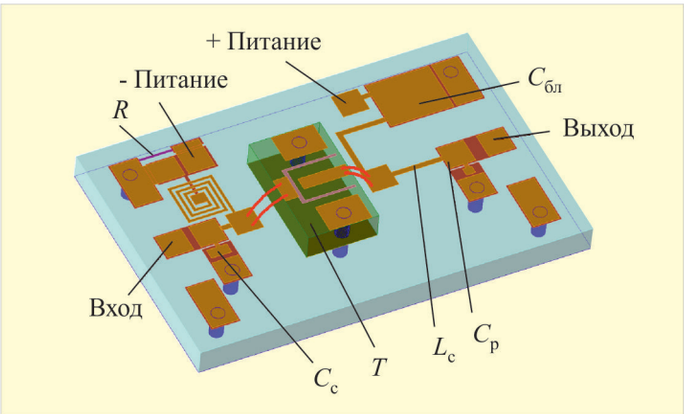


Рис. 11. Базовая конструкция мощной ГМИС СВЧ нового поколения

Базовое конструктивно-технологическое решение нового поколения ГМИС СВЧ, обеспечивающее преодоление вышеперечисленных недостатков ГМИС, показано на рис. 11.

ГМИС СВЧ представляет собой однокаскадный усилитель мощности, выполненный на диэлектрической плате из поликристаллической алмазной пленки (ПАП) толщиной 100 мкм. В этой конструкции мощной ГМИС СВЧ на лицевой стороне платы выполнены монолитно все пассивные элементы, линии переда-

2(533).indd 62 23.06.2017 10:20:03

чи, выводы. Навесным активным компонентом является кристалл полевого транзистора, который соединен с пассивной частью ГМИС с помощью проволочных проводников. На обратной стороне платы выполнено металлизационное покрытие, в объеме платы сделаны сквозные металлизированные отверстия, а заземлена интегральная схема посредством этих сквозных металлизированных отверстий.

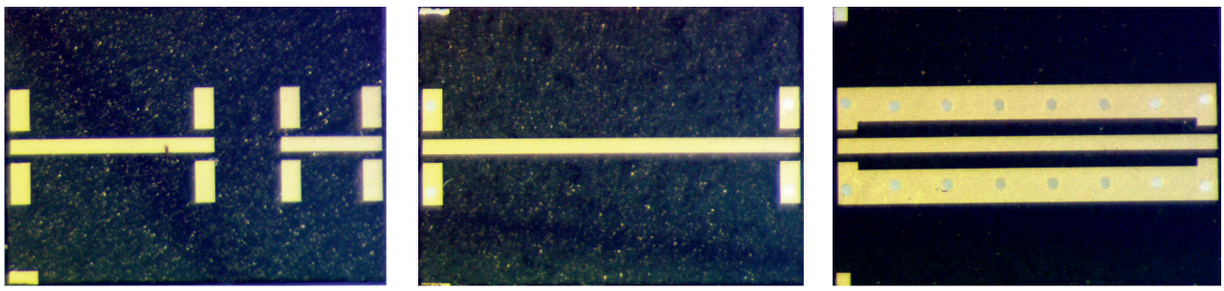
Это конструктивно-технологическое решение обеспечивает преодоление всех вышеперечисленных недостатков, присущих известным конструкциям ГМИС СВЧ.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕРЬ В РЕАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ ГМИС СВЧ

В рассмотренном конструктивно-технологическом решении (см. рис. 11) тонкопленочные элементы имеют традиционную конструкцию. Однако, поскольку все элементы размещены на плате из ПАП толщиной 100 мкм, потребовались дополнительные исследования потерь в микрополосковой и копланарной линиях (МПЛ и КЛ). Теоретические расчеты проводились с помощью программы ADS.

Потери в МПЛ и КЛ на плате из арсенида галлия толщиной 100 мкм сравнивались с потерями в МПЛ и КЛ на аналогичных платах из ПАП толщиной 100 мкм. Для измерения потерь в диапазоне частот от 1 до 40 ГГц использовался векторный анализатор цепей PNA-X, N5247 (фирма Keysight, США), позволяющий измерять *S*-параметры и оптимальные нагрузки на входе и выходе четырехполюсников в диапазоне частот от 1 до 67 ГГц.

Отрезки МПЛ и КЛ (рис. 12) длиной 1, 2 и 3,6 мм изготовлены на алмазных платах размерами 3,8×2,8×0,1 мм.



а) *б*) *в*)

Рис. 12. МПЛ и КЛ длиной 1 мм (*а*), 2 мм (*б*) и 3,6 мм (*в*), изготовленные на алмазных платах размерами 3,8×2,8×0,1 мм

На рис. 13 показаны зависимости потерь (на 1 мм длины линии) в МПЛ и КЛ на алмазных платах в диапазоне частот 1…40 ГГц в сравнении с измеренными потерями для МПЛ и КЛ на GaAs-плате толщиной 100 мкм.

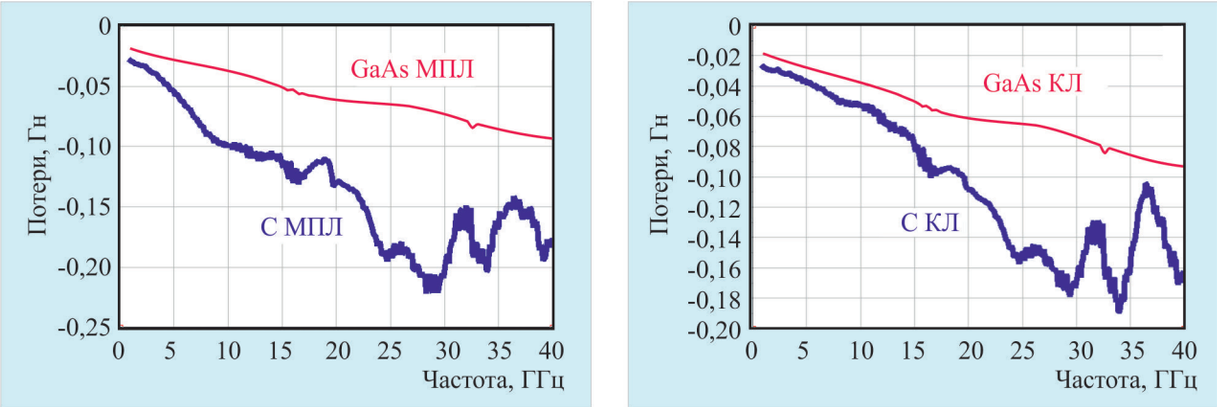
Из рис. 13 видно, что потери в МПЛ на GaAs-плате в диапазоне частот 1…40 ГГц меньше, чем измеренные потери в МПЛ и КЛ на алмазных платах. Потери в МПЛ и КЛ на алмазных платах невелики, поэтому в ГМИС СВЧ можно использовать оба типа линий.

4. ИССЛЕДОВАНИЕ МОЩНЫХ ОДНОКАСКАДНЫХ ГМИС СВЧ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Авторами исследованы первые мощные однокаскадные ГМИС СВЧ нового поколения на алмазных платах. ГМИС СВЧ изготавливались на GaN-транзисторе типа TGF2023-1. На рис. 14

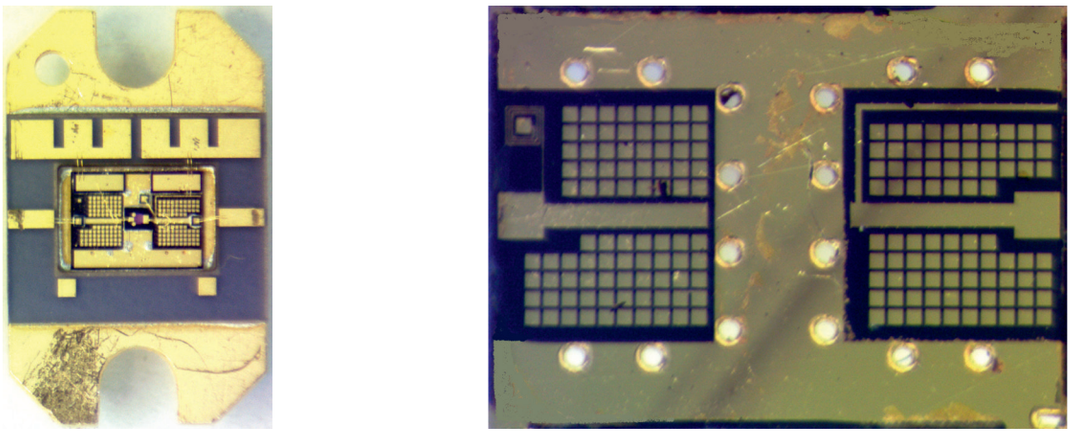
2(533).indd 63 23.06.2017 10:20:03

показана конструкция мощной однокаскадной усилительной ГМИС СВЧ, в которой все элементы и компоненты расположены на лицевой стороне единой алмазной платы.



а) *б*)

Рис. 13. Зависимости потерь в МПЛ (*а*) и в КЛ (*б*) на алмазной плате в сравнении с потерями на GaAs-плате в диапазоне частот 1…40 ГГц



а) *б*)

Рис. 14. Конструкция однокаскадной мощной усилительной ГМИС СВЧ нового поколения на рабочую частоту 10 ГГц (*а*) и алмазная плата ГМИС СВЧ нового поколения (*б*)

Из рис. 14, *а* видно, что ГМИС СВЧ нового поколения имеет базовую конструкцию. Плоское золоченое металлическое основание размерами 7,5×12×1 мм служит теплоотводом. На металлическое основание припаяна рамка размерами 7,5×6×0,5 мм с микрополосковыми выводами входа и выхода, имеющими волновое сопротивление 50 Ом, и контактными площадками для подачи питания. В рамке имеется окно размерами 4,5×3 мм, в которое непосредственно на плоскость металлического основания устанавливается единая алмазная плата размерами 3,8×2,8×0,1 мм. На плате расположены транзистор TGF2023-1, блокировочные и развязывающие конденсаторы. Из рис. 14, *б* видно, что алмазная плата ГМИС СВЧ нового поколения содержит все пассивные элементы схемы (линии, индуктивности, короткие отрезки линий – квадраты), изготовленные монолитно на лицевой поверхности платы. На обратной стороне алмазной платы находится заземляющая металлизация, а в объеме платы выполнены металлизированные за-

2(533).indd 64 23.06.2017 10:20:04

земляющие отверстия для заземления контактов лицевой стороны. При этом кристалл мощного нитридгаллиевого транзистора, блокировочные и развязывающие конденсаторы монтируются также на лицевую поверхность алмазной платы и соединяются с ее контактными площадками с помощью золотой проволоки.

Электрическая схема ГМИС однокаскадного усилителя мощности на полевом транзисторе соответствует рис. 6, *а*. Реактивными элементами в схеме являются индуктивные элементы L_c в виде линий и емкостные элементы C_c в виде отрезков линий – квадратов. Эти элементы, L_c и C_c, служат для согласования полевого транзистора с генератором и нагрузкой по входной и выходной цепям соответственно. Для обеспечения развязки по постоянному и переменному току используются разделительные $C_р$ и блокировочные $C_{бл}$ конденсаторы большой емкости. Для подачи питания в затворную цепь транзистора используется дроссель $L_{др}$ в виде плоской индуктивности. Питание усилителя осуществляется от двух независимых источников питания: стоковая цепь – от импульсного источника с длительностью импульса 10 мкс, скважностью 10 и напряжением +30 В и затворная цепь – от постоянного источника напряжением -2,6 В.

На рис. 15 и 16 приведены измеренные характеристики для двух образцов однокаскадного усилителя на транзисторе TGF2023-1 в диапазоне частот 9…12,5 ГГц. Образцы № 1 и 2 настроены на центральную частоту 10 и 12 ГГц соответственно.

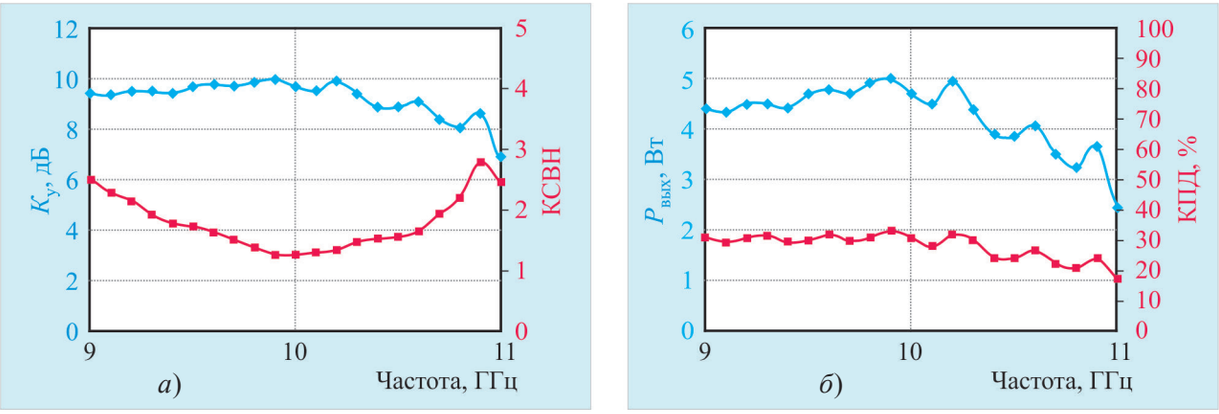


Рис. 15. Зависимости усиления, входного КСВН, выходной мощности и КПД от рабочей частоты при входной мощности 0,5 Вт для образца № 1

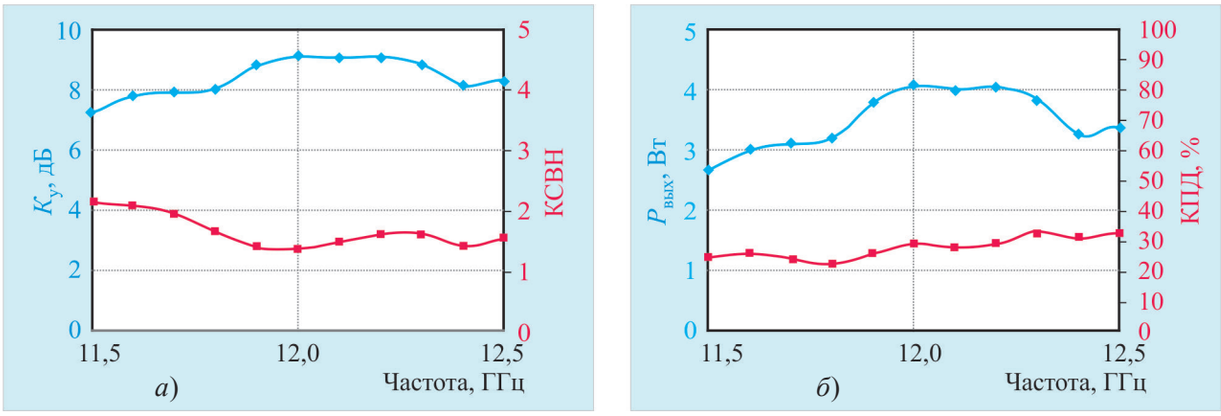


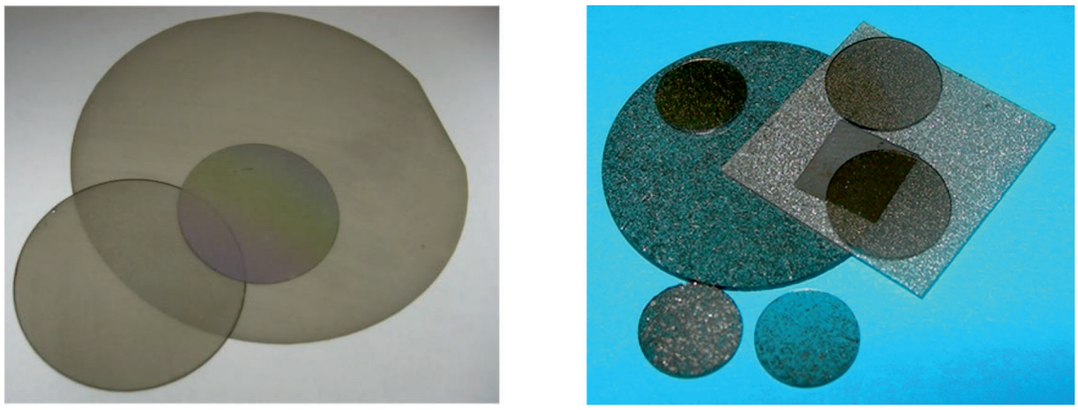
Рис. 16. Зависимости усиления, входного КСВН, выходной мощности и КПД от рабочей частоты при входной мощности 0,5 Вт для образца № 2

2(533).indd 65 23.06.2017 10:20:04

Исследование показало, что ГМИС СВЧ нового поколения по своим параметрам не уступают исследованным выше ГМИС СВЧ мозаичной конструкции.

5. ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ГМИС СВЧ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Основой для изготовления алмазных плат для мощных ГМИС СВЧ является ПАП. В настоящее время многие зарубежные фирмы и отечественные организации выращивают ПАП. В Москве выращиванием ПАП занимаются ИОФ РАН, ООО «Твинн». На рис. 17 показан внешний вид ПАП зарубежного и отечественного производства.



а) *б*)

Рис. 17. ПАП зарубежного (*а*) и отечественного (ООО «Твинн») (*б*) производства диаметром 2, 3 и 4 дюйма

По внешнему виду зарубежные ПАП лучше, чем отечественные, однако зарубежные ПАП мы видим только на картинке.

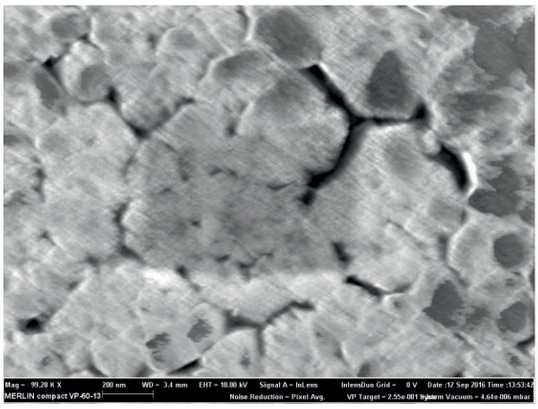
В настоящее время на «НПП «Исток» поставляются отечественные ПАП. В ИОФ РАН и ООО «Твинн» ПАП выращиваются методом CVD на полированной стороне «жертвенной» пластины монокристаллического кремния диаметром 50 и 57 мм, имеющего шероховатость поверхности 0,01 мкм (R_a = 10 нм, R_z = 50 нм). Исследование поверхности поставляемых ПАП толщиной 100 мкм проводилось с помощью растрового электронного микроскопа Merlin Compact VP-60-30. На рис. 18 показаны результаты исследования поверхности ПАП.

Измерение шероховатости поверхности проводилось с помощью профилометра Dektak 150. Без обработки лицевая (подложечная) сторона ПАП имеет R_z = 70 нм, R_a = 20 нм, что соответствует шероховатости 0,02 мкм, на ростовой стороне ПАП R_z = 10 мкм, R_a = 2 мкм, что соответствует шероховатости 2,5 мкм.

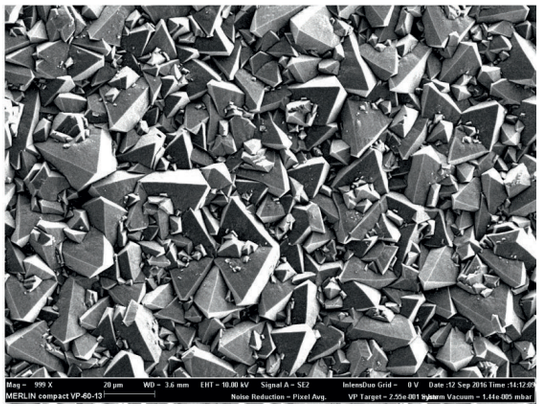
Измерение поверхностного и объемного сопротивления ПАП проводилось методом последовательного вольтметра. Результаты измерения приведены в табл. 1.

Измерение теплопроводности ПАП проводилось исполнителем – ИОФ РАН. Теплопроводность ПАП толщиной 100 мкм оценивалась при комнатной температуре с помощью лазерного флэш-метода для отделенных от подложки пленок. Полученные значения теплопроводности составляют 1000…1100 Вт/(м·К). Установки для определения теплопроводности ПАП в АО «НПП «Исток» им. Шокина» в настоящее время нет.

2(533).indd 66 23.06.2017 10:20:05



а)



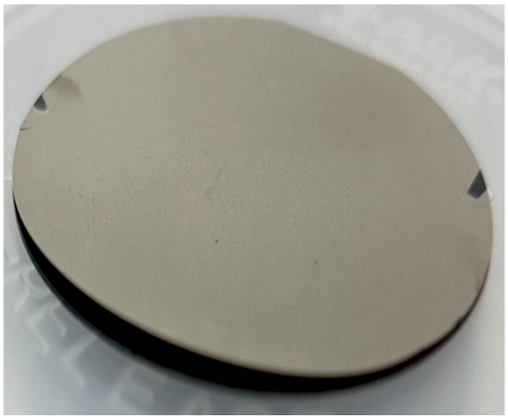
б)

Рис. 18. Фотографии лицевой (подложечной) стороны (*а*) и обратной (ростовой) стороны (*б*) ПАП

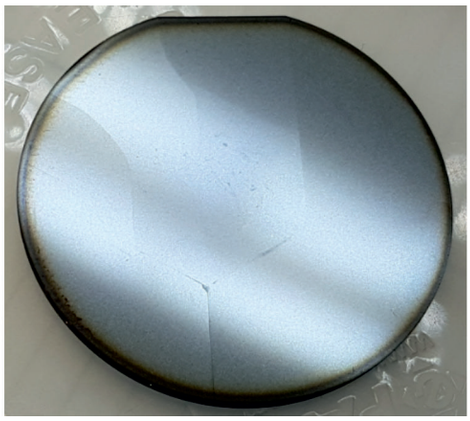
Таблица 1

Материал	Поверхностное сопротивление, Ом·см	Объемное сопротивление, Ом·см
Кремний высокоомный, ориентация (111)	$> 10^4$	$> 10^4$
Арсенид галлия	$> 10^7$	$> 10^7$
Поликристаллическая алмазная пленка	$> 10^{12}$	$> 10^{12}$
Лейкосапфир	$> 10^{13}$	$> 10^{13}$

Исследование внешнего вида ПАП–Si проводилось путем внешнего осмотра и фотографирования пластины в естественном свете и с подсветкой (рис. 19).



а)



б)

Рис. 19. ПАП–Si в естественном свете (*а*) и с подсветкой поверхности (*б*)

2(533).indd 67 23.06.2017 10:20:06

Из рис. 19, *а* видно, что ПАП отслоилась от подложки кремния и поэтому между ними образовалась щель. Это указывает на высокую напряженность ПАП и ее прогиб. Пленки получаются очень напряженными из-за разного теплового коэффициента линейного расширения: для алмаза ТКЛР равен 1,1, а для кремния – 5. Из рис. 19, *б* видно, что поверхность пластины имеет трещины и после отделения ПАП она рассыпается на отдельные куски. Учитывая, что диаметр пластины – 50 мм, куски получаются небольшими и имеют прогиб. И именно с этими кусками приходится работать.

Малые размеры пластин (куски ПАП произвольной формы, имеющие прогиб) не позволяют пока в полной мере использовать все возможности современной литографии и планарной технологии оборудования пилотной линии в АО «НПП «Исток» им. Шокина» для группового изготовления плат мощных ГМИС СВЧ на ПАП.

6. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОТВЕРСТИЙ В ПАП

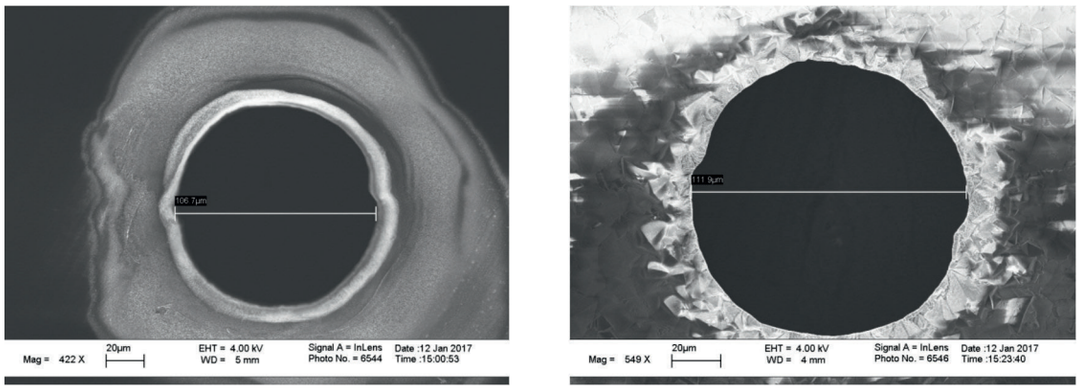
Важной и трудной задачей в технологии изготовления плат мощных ГМИС СВЧ является формирование металлизированных отверстий в ПАП.

Диаметр отверстий в плате, как правило, равен толщине платы. Для плат мощных ГМИС СВЧ предполагается использовать ПАП толщиной 100…200 мкм. В настоящее время используется несколько способов выполнения отверстий в диэлектрических пластинах.

Лазерное фрезерование

Это наиболее известный и широко применяемый способ изготовления отверстий в диэлектрических и металлических пластинах. Современные лазеры видимого света на парах меди имеют великолепные характеристики и обеспечивают апертуру луча лазера порядка 10 мкм.

Проведено исследование отверстий, изготовленных в пластинах ПАП для плат мощных ГМИС СВЧ и плат корпусов поверхностного монтажа SMD с помощью лазера видимого света на парах меди. Результаты исследования представлены на рис. 20.



а) *б*)

Рис. 20. Отверстия с лицевой (*а*) и ростовой стороны (*б*) в пластине ПАП

Из рис. 20 видно, что отверстие с лицевой стороны имеет размер 106,7 мкм, а с обратной стороны – 111,9 мкм при заданном диаметре отверстия 100 мкм и толщине ПАП 100 мкм. При

2(533).indd 68 23.06.2017 10:20:06

этом получаемые отверстия имеют четкую геометрию и практически вертикальные стенки, скос которых составляет порядка 5 %. Отверстия формировались лазером с обратной стороны пластины. Однако лазер не может обеспечить групповую обработку пластин, имеет низкую производительность, так как изготавливает отверстия последовательно, и поэтому стоимость изготовления одного отверстия высока.

Плазмохимическое травление

Плазмохимическое травление поликристаллической алмазной пленки описано в отечественной и зарубежной литературе. В частности, в работе [8] исследован способ реактивного ионного травления (РИТ) синтетической ПАП в плазме на основе Ar, O_2, их смесей и SF_6. При этом достигнута скорость травления 70 нм/мин с маской алюминия. Процесс проводился в установке РИТ при мощности ВЧ-источника 30 Вт, давлении 5…6 Па и газовом составе плазмы: Ar, O_2, SF_6 в соотношении 1:1:1. Полученная скорость травления достаточно низкая и, если травить отверстия ПАП толщиной 100 мкм, потребуется 24 ч. Низкая скорость травления ПАП связана с типом установки, которая не может обеспечить высокую интенсивность плазмы.

В настоящее время высокую интенсивность (10^{11}…10^{12} е/см^3) обеспечивают установки РИТ с источником индуктивно связанной плазмы (ИСП). На рис. 21 приведены конструкции реакторов этих установок.

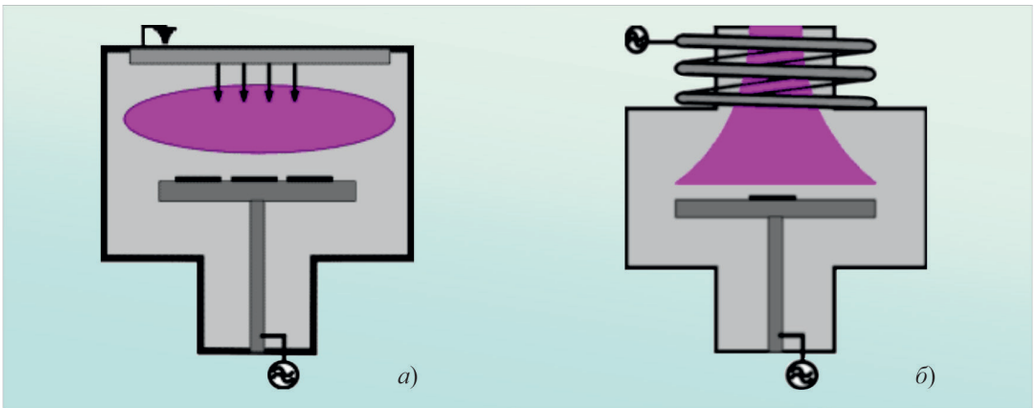
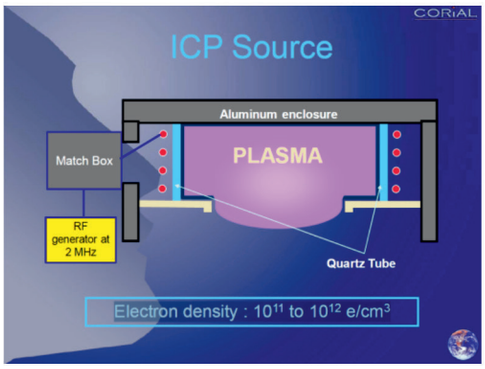


Рис. 21. Реактивное ионное травление (*а*)
и реактивное ионное травление с ИСП-источником (*б*)

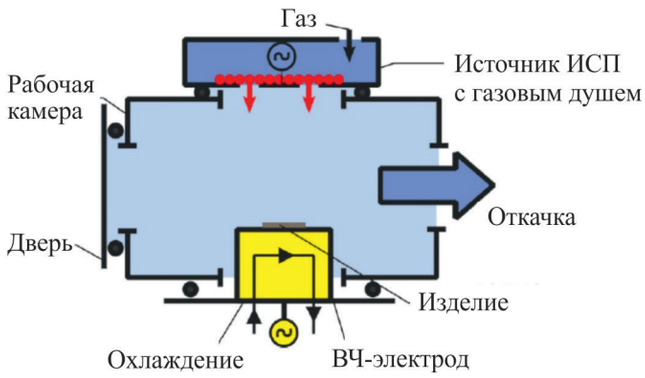
Именно РИТ с ИСП-источником используется для быстрого травления диэлектрических пленок на большую глубину в зарубежных и отечественных установках. На рис. 22 приведены конструкции реакторов этих установок.

Отсутствие полной априорной информации о скорости травлении ПАП потребовало проведения исследований и оптимизации технологических режимов травления этих пленок. Процесс РИТ с ИСП-источником зависит от множества технологических факторов, и поэтому решить задачу в аналитическом виде оказалось затруднительно. Вместе с тем с помощью метода планирования эксперимента возможно отыскание экспериментальной зависимости скорости травления ПАП от технологических факторов процесса РИТ с ИСП-источником, т. е. построение математической модели вида: $y = f(x_1, x_2, x_3 \ldots x_n)$, где y – показатель скорости травления ПАП, а x_i – факторы технологического процесса.

2(533).indd 69 23.06.2017 10:20:06



а)



б)

Рис. 22. Реактивное ионное травление с ИСП-источником «Corial 200IL» (*а*) и реактивное ионное травление с ИСП-источником «Плазма ТМ 09», НИИТМ, г. Зеленоград (*б*)

Предварительные эксперименты показали, что скорость травления ПАП зависит от множества факторов.

Наибольшая скорость травления получается при максимальной мощности генератора, наибольшем процентном соотношении O_2, оптимальном процентном соотношении Ar и SF_6 и рабочем давлении в установке. Максимальная скорость травления 1,3 мкм/мин достигнута при мощности R_F = 250 Вт. Эта мощность является предельной для установки Corial 200IL. На основе предварительных экспериментов выбраны факторы эксперимента и составлен план факторного эксперимента для поиска оптимальных параметров технологического процесса травления отверстий.

Параметр оптимизации – скорость травления поликристаллической алмазной пленки y.

Факторы технологического процесса: x_1 – скорость потока элегаза SF_6; x_2 – скорость потока O_2; x_3 – скорость потока Ar; x_4 – мощность генератора R_F = 230 Вт; x_5 – мощность индуктивно связанной плазмы $P_{ИСП}$ = 1000 Вт; x_6 – давление в камере p = 10 мТорр.

Задачей исследования являлось определение зависимости скорости травления ПАП от факторов технологического процесса.

Диапазон изменения факторов x_1, x_2, x_3 в планируемом эксперименте (табл. 6) был выбран на основе априорной информации о технологическом процессе, практического опыта и возможностей технологической установки Corial 200IL.

В связи с отсутствием полной априорной информации о характере исследуемой зависимости скорости травления ПАП, с целью аппроксимации изучаемой зависимости полиномом первого порядка был составлен план полного факторного эксперимента с учетом парных и тройных взаимодействий. Опыты выполнялись однократно, а опыт в центре эксперимента дублировался три раза. Результаты измерения параметра – скорости травления пленки ПАП приведены в табл. 2 и 3. По этим данным рассчитаны коэффициенты уравнения для параметра оптимизации y:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3.$$

2(533).indd 70 23.06.2017 10:20:07

Таблица 2

Фактор	Уровень фактора		
	-1	0	1
x_1, см^3/мин	0,3	0,4	0,5
x^2, см^3/мин	40	60	80
x^3, см^3/мин	20	35	50

Таблица 3

№ опыта	Факторы эксперимента				Парные взаимодействия				Скорость травления V, мкм/мин
	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	
1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	0,95
2	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1,06
3	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1,09
4	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1,17
5	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1,09
6	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	0,97
7	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	0,82
8	1	1	1	1	1	1	1	1	0,95
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,01

Расчет коэффициентов уравнения проводился по каждому фактору и с учетом парных взаимодействий. Найденные коэффициенты позволяют записать уравнение скорости травления ПАП, которое будет иметь вид:

$$y = 1{,}0125 + 0{,}025\cdot x_1 + 0{,}0625\cdot x_2 - 0{,}055\cdot x^3 - 0{,}04\cdot x_1x_2 - 0{,}023\cdot x_1x_3 + 0\cdot x_2x_3 - 0{,}033\cdot x_1x_2x_3.$$

Анализ уравнения показывает, что наибольший вклад в увеличение скорости травления ПАП дает O_2. Вклад SF_6 в три раза меньше, а Ar уменьшает скорость травления ПАП, и его необходимо уменьшить до минимума. С учетом этого оптимальные технологические режимы процесса травления ПАП следующие:

Скорость потока SF_6..... 0,5 см^3/мин
Скорость потока O_2..... 80 см^3/мин
Скорость потока Ar..... 20 см^3/мин

Соответственно можно графически представить технологический процесс травления отверстий в ПАП как функцию от x_2 – скорости потока O_2 (рис. 23), при этом $x_1 = 1$, $x_3 = -1$. Тогда уравнение скорости травления ПАП запишется как

$$y = 1{,}0125 + 0{,}025\cdot(1) + 0{,}0625\cdot x_2 - 0{,}055\cdot(-1) - 0{,}04\cdot(1)\cdot x_2 -$$
$$- 0{,}023\cdot(1)\cdot(-1) - 0{,}033\cdot(1)\cdot x_2\cdot(-1) = 1{,}1155 + 0{,}0555\cdot x_2.$$

Из рис. 23 видно, что в выбранном диапазоне факторов скорость имеет линейный характер и не имеет насыщения. При этом достигнута скорость травления 1171 нм/мин с маской титан-никель.

2(533).indd 71 23.06.2017 10:20:07

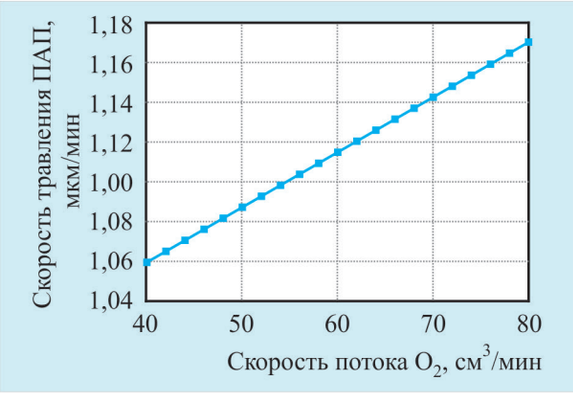


Рис. 23. Зависимость скорости травления ПАП от скорости потока O_2

Для сравнения в тех же оптимальных технологических режимах был проведен процесс травления ПАП на установке РЕТ с ИСП-источником отечественного производства «МВУ ТМ Плазма 03» (НИИТМ, г. Зеленоград). Получена скорость травления 300 нм/мин.

Выигрыш по скорости травления ПАП на установке «Corial 200IL» составляет 4 раза по сравнению с установкой «МВУ ТМ Плазма 03».

Для изготовления плат мощных ГМИС СВЧ используются ПАП толщиной 100 мкм. При скорости травления 1,171 мкм/мин время травления ПАП толщиной 100 мкм составит 85 мин. При этом процесс травления ПАП проходит преимущественно в среде O_2 и продуктом реакции является CO_2. Это экологически чистый процесс, не наносящий вреда окружающей среде.

7. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ИЗГОТОВЛЕНИЯ АЛМАЗНЫХ ПЛАТ НА ПАП

Авторами разработана технология изготовления алмазных плат на ПАП–Si для нового поколения мощных ГМИС СВЧ. Разработан упрощенный технологический процесс для изготовления плат мощных ГМИС СВЧ, который используется как для создания тестовой микросхемы, измерения на ней *S*-параметров, коэффициента усиления, выходной мощности, КПД и восстановления нелинейной модели кристалла мощного СВЧ-транзистора, так и для создания экспериментальных однокаскадных мощных усилительных ГМИС СВЧ. На рис. 24 показана последовательность технологических операций в упрощенном технологическом процессе изготовления монолитной пассивной части ГМИС, размещенной на единой плате из алмаза, изготавливаемой по групповой технологии на ПАП–Si с применением методов литографии и планарной технологии.

1. Полученная пластина ПАП–Si оценивается по внешнему виду и параметрам: количеству трещин, прогибу, шероховатости, толщине, неоднородности по толщине, поверхностному и объемному сопротивлениям. После этого «жертвенная» подложка кремния химически стравливается и отделяется ПАП.

2. В ПАП после ее отделения появляются дополнительные трещины, по которым она разделяется на несколько бесформенных кусков. Куски ПАП имеют малую площадь, существенный прогиб, большую шероховатость обратной стороны и неравномерность по толщине. Поэтому приходится использовать шлифовку с обратной (ростовой) стороны, чтобы уменьшить шероховатость и получить ПАП заданной толщины.

2(533).indd 72 23.06.2017 10:20:07

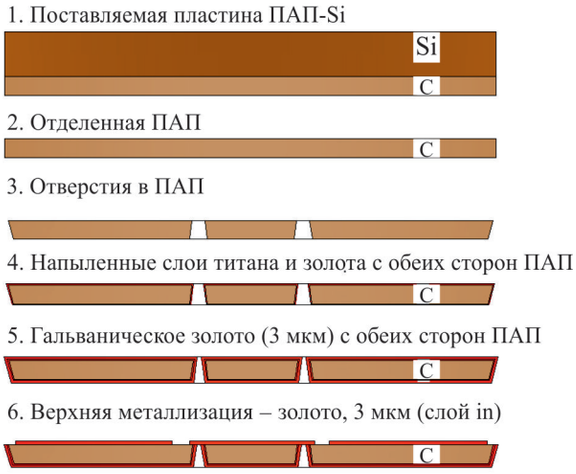


Рис. 24. Упрощенный технологический процесс изготовления монолитной пассивной части ГМИС, размещенной на единой плате из алмаза

3. Лазерным фрезерованием в ПАП формируются сквозные отверстия с помощью установки «Каравелла», оснащенной лазером видимого света на парах меди.

4. На всю поверхность ПАП вакуумным напылением, последовательно, в одном технологическом процессе наносятся слои титана (0,1 мкм) и золота (0,3 мкм) при температуре 200 °С. Металлизация титан, золото наносится сначала с лицевой стороны ПАП, а затем с ее обратной стороны, при этом одновременно обеспечивается металлизация отверстий, соединяющих верхнюю металлизацию с нижней.

5. На металлизацию с обеих сторон ПАП гальванически наращивается слой золота толщиной 3 мкм (слой in).

6. На лицевой стороне ПАП проводится первая фотолитография для формирования верхнего слоя металлизации, т. е. протравливаются последовательно слои золота, титана. В этом слое изготавливаются линии МПЛ и КЛ, индуктивные и емкостные отрезки линий МПЛ и КЛ, спиральные индуктивности, контактные площадки и проводники, объединяющие все элементы в единую электрическую схему.

7. Проводится вторая фотолитография, с помощью которой на обратной стороне по линии разделения ПАП на платы формируется сетка и слои золота (3 мкм), титана (0,1 мкм) протравливаются насквозь.

Далее следует операция разделения ПАП на платы с помощью установки лазерного фрезерования «Каравелла», оснащенной лазером видимого света на парах меди.

Именно этот упрощенный технологический процесс использовался для изготовления плат с отрезками линий МПЛ и КЛ с волновым сопротивлением 50 Ом, платы для измерения СВЧ-параметров кристалла мощного СВЧ-транзистора и восстановления его нелинейной модели, а также для создания плат экспериментальных однокаскадных мощных усилительных ГМИС СВЧ на транзисторах нитрида галлия.

На рис. 25 показаны куски ПАП, на которых изготавливались алмазные платы для ГМИС СВЧ нового поколения.

8. ВЫВОДЫ

1. Созданы первые макетные образцы мощных ГМИС СВЧ нового поколения на единой алмазной плате.

2. Выбран базовый материал – ПАП для изготовления алмазных плат мощных ГМИС СВЧ.

2(533).indd 73 23.06.2017 10:20:08

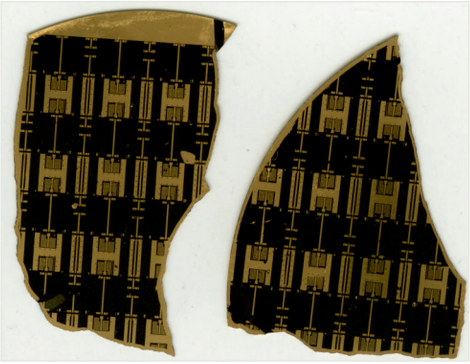


Рис. 25. Куски ПАП, на которых по групповой технологии изготавливаются платы для ГМИС СВЧ нового поколения

3. Исследованы методы изготовления отверстий в ПАП с помощью лазера и реактивного ионного травления.

4. Проведен полный факторный эксперимент и найдены оптимальные технологические режимы травления отверстий в ПАП с помощью установки реактивного ионного травления Corial 200IL с максимальной скоростью приблизительно 1,2 мкм/мин.

5. Разработан упрощенный технологический процесс группового изготовления алмазных плат мощных ГМИС на ПАП и самих ГМИС СВЧ. При этом технологический процесс, включающий изготовление металлизированных отверстий и металлизацию обратной стороны ПАП, адаптирован в технологию изготовления ГМИС и МИС СВЧ, имеющуюся в настоящее время в АО «НПП «Исток» им. Шокина».

6. Упрощенный технологический процесс изготовления плат мощных ГМИС используется для изготовления отрезков МПЛ и КЛ, для измерения СВЧ-параметров кристалла мощного СВЧ-транзистора и восстановления его нелинейной модели, а также для создания плат экспериментальных однокаскадных мощных усилительных ГМИС СВЧ на транзисторах нитрида галлия.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Темнов, А. М.** Исследование мощных усилительных ГМИС *X*-диапазона длин волн на транзисторах нитрида галлия / А. М. Темнов, К. В. Дудинов и др. // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2015. – Вып. 2 (525). – С. 4 – 20.

2. **Темнов, А. М.** Исследование мощных усилительных ГМИС *X*-диапазона длин волн на транзисторах нитрида галлия / А. М. Темнов, К. В. Дудинов и др. // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2016. – Вып. 2 (529). – С. 45 – 53.

3. **А. с. 204807 СССР**. Конструкция интегрального прибора / А. М. Темнов, В. А. Лукъянов, В. Л. Наумов и др. – Приоритет 26.05.83.

4. **Темнов, А. М.** Исследование и создание гибридно-монолитных усилительных и преобразовательных приборов СВЧ на малошумящих бескорпусных полевых транзисторах в диапазоне от 0,3 до 18 ГГц: дис. канд. техн. наук / А. М. Темнов. – 19279.

5. **Борисов, А. А.** Твердотельная СВЧ-электроника. Развитие твердотельной СВЧ-электроники на ФГУП «НПП «Исток» / А. А. Борисов, А. Н. Королев // История отечественной электроники. – Т. 1, гл. 3. – С. 311 – 327.

6. **Пат. 2285930 РФ**. Зонд для измерения электрических характеристик планарных элементов интегральных схем / А. М. Темнов, Н. В. Шульга, К. В. Дудинов. – Приоритет 11.04.05.

7. **Пат. 2293339 РФ**. Многоконтактный зонд для испытания планарных элементов интегральных схем / А. М. Темнов, Н. В. Шульга, К. В. Дудинов. – Приоритет 25.06.05.

8. **Голованов, А. В.** Реактивное ионное травление поверхности синтетического алмаза / А. В. Голованов и др. / Труды МФТИ. – 2013. – Т. 5. – № 1. – С. 31 – 35.

Статья поступила 20 февраля 2017 г.

2(533).indd 74 23.06.2017 10:20:08

УДК 621.396.62:621.396.677.494

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПРИЁМОПЕРЕДАЮЩЕГО МОДУЛЯ АФАР СВЧ-ДИАПАЗОНА

А. Г. Далингер, В. М. Малыщик, В. А. Иовдальский

АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино

Разработана новая структурная схема приёмопередающего модуля АФАР с двумя приёмными каналами. Наличие второго приёмного канала, включаемого параллельно с первым приемным каналом через делитель мощности, обеспечивает разделение принимаемого сигнала и одновременное формирование двух приемных диаграмм направленности, что позволяет в режиме приема увеличить угол обзора, повысить точность определения координат цели и потенциал системы (дальность обнаружения цели) приемопередающего модуля.

КС: приёмопередающий модуль, АФАР, структурная схема, приёмный и передающие каналы, сигнал, МИС, фазовращатель, аттенюатор

UPGRADING THE STRUCTURE OF MICROWAVE ACTIVE PHASED ARRAY TRANSMITTER-RECEIVER MODULE

A. G. Dalinger, V. M. Malyshchik, V. A. Iovdalsky

JSC «RPC «Istok» named after Shokin», Fryazino

A new block diagram of the active phased array transmitter-receiver module with two receiving channels has been developed. The availability of the second receiving channel switched on in parallel with the first receiving channel through power divider provides the separation of the received signal with simultaneous formation of two receiving directivity patterns which allows to increase angle of view, increase the accuracy of the target coordinates setting and system potential (target detection range) in the receiving mode of the transmitter-receiver module.

Keywords: transmitter-receiver module, active phased array, block diagram, receiving and transmitting channels, signal, MIC, phase shifter, attenuator

1. ВВЕДЕНИЕ

Ведущими отечественными и зарубежными предприятиями на протяжении последних 20 лет ведутся работы по созданию систем радиолокации с твердотельными АФАР. Накоплен достаточный опыт в этом направлении, и разработаны типовые структурные схемы приёмопередающих модулей (ППМ) АФАР [1]. Стремление дальнейшего улучшения характеристик таких устройств побуждает специалистов к их последовательному совершенствованию.

2(533).indd 75 23.06.2017 10:20:08

2. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ППМ АФАР

Одна из известных структурных схем ППМ АФАР [2] представлена на рис. 1.

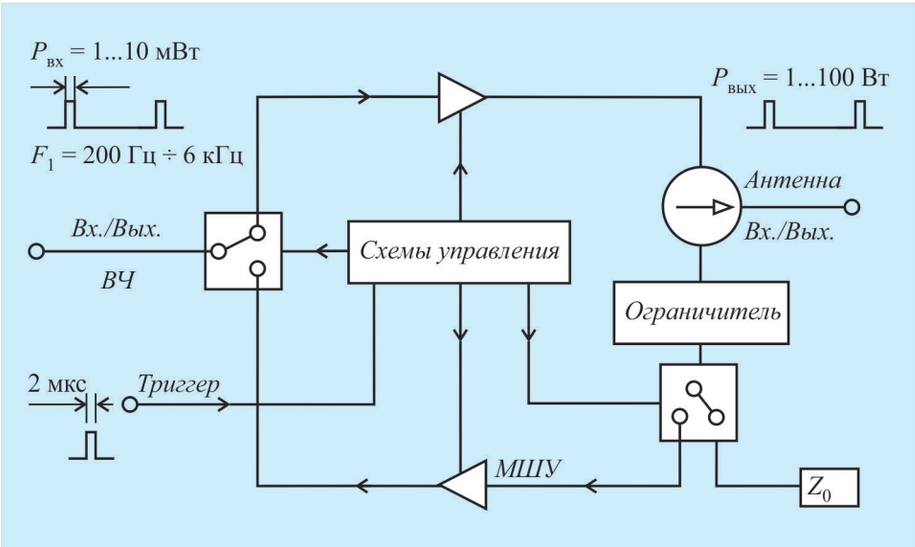


Рис.1. Структурная схема ППМ АФАР [2]

На входе приемного канала находятся защитное (ограничительное) устройство и двухкаскадный малошумящий усилитель. В передающем канале установлен трехкаскадный усилитель мощности. В модуле имеются два переключателя: первый расположен в приемном канале, между запоминающим устройством и малошумящим усилителем, а второй – в передающем канале, перед усилителем мощности. Передатчик запускается триггером через блок схем управления и второй переключатель. После излучения ВЧ-импульса модуль возвращается в режим приема командой от блока схем управления. Для предупреждения перегрева транзисторы передатчика работают в ключевом режиме класса «А» (питание на транзисторы подается только во время действия ВЧ-импульса, что обеспечивается командой с блока схем управления). Длительность действия питающего напряжения превышает длительность ВЧ-импульса.

Недостатком данного технического решения является необходимость постоянного изменения кодов управления фазовращателями и аттенюаторами, синхронно с переключением режима «прием/передача». При этом схемы управления должны иметь маленькие времена переключения (несколько десятков наносекунд). Это приводит к появлению паразитных составляющих в спектре передающего и приемного каналов и необходимости введения временных перекрывающих окон при приеме и передаче, а значит, к потере потенциала системы.

Рассмотрим также ППМ АФАР [3, 4], структурная схема которого приведена на рис. 2.

Приемный канал модуля включает защитное устройство и последовательно с ним соединенные малошумящий усилитель и первый переключатель «прием/передача». В состав передающего канала входят второй переключатель «прием/передача», предварительный усилитель и последовательно включенный с ними выходной усилитель мощности. Переключатель, контакт «вход-выход» которого является выходом модуля, подключен к двум – первому и второму – переключателям. Первый и второй переключатели соединены через цепь из последовательно включен-

2(533).indd 76 23.06.2017 10:20:08

ных, управляемых *n*-разрядного аттенюатора и *n*-разрядного фазовращателя, которые являются общими для приемного и передающего каналов. В положении переключателей «передача» выход первого переключателя соединен со входом аттенюатора, выход аттенюатора – со входом фазовращателя, выход фазовращателя – со входом второго переключателя, выход второго переключателя – со входом предварительного усилителя, выход предварительного усилителя – со входом усилителя мощности, а выход усилителя мощности – с излучающей антенной. В положении переключателей «прием» вход второго переключателя соединен с выходом фазовращателя, вход фазовращателя – с выходом аттенюатора, вход аттенюатора – с выходом первого переключателя, вход первого переключателя – с выходом малошумящего усилителя, вход малошумящего усилителя – с выходом защитного устройства, а вход защитного устройства – с антенной.

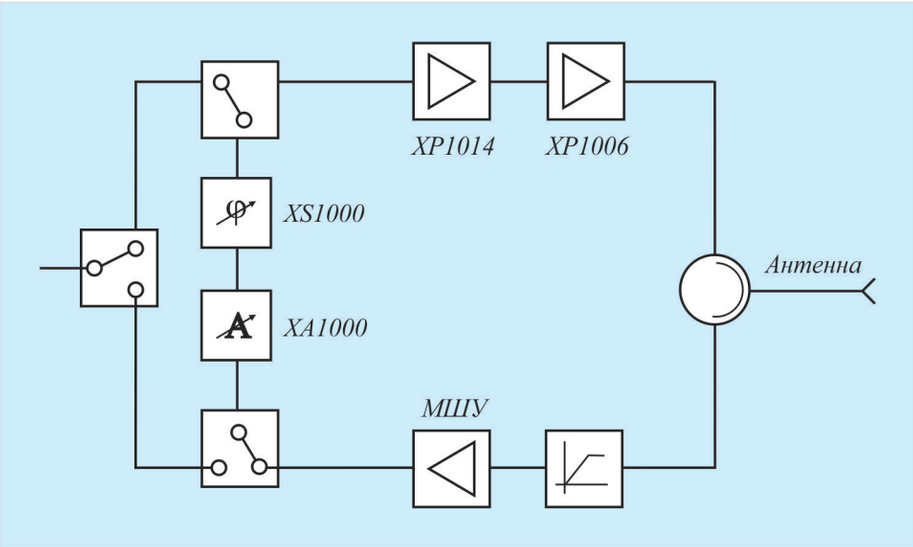


Рис. 2. Структурная схема ППМ АФАР [3, 4]

Недостатками данного технического решения являются отсутствие возможности формирования одновременно двух диаграмм направленности антенны и недостаточно высокое быстродействие, что связано с дополнительным временем на формирование фазочастотных и амплитудно-частотных характеристик в режимах работы приема и передачи.

Недостатки, присущие имеющимся ППМ АФАР, заставляют специалистов продолжать их совершенствование. В работе [5] представлено техническое решение (рис. 3), позволившее значительно улучшить характеристики такого устройства, а именно: увеличить угол обзора, повысить точность определения координат цели и потенциал системы (дальность обнаружения цели). Это достигнуто путем формирования одновременно двух диаграмм направленности антенны и увеличения быстродействия за счет уменьшения времени параллельной обработки принимаемых сигналов.

Этот ППМ АФАР СВЧ-диапазона содержит по меньшей мере один переключатель на 2 положения, контакт «вход-выход» которого является входом-выходом модуля. Контакт «выход» в положении переключателя «передача» подключен к входу передающего канала, контакт «вход» в положении переключателя «прием» – к выходу приемного канала, второй контакт «вход» – к коммутатору. Передающий канал, включающий последовательно соединенные по меньшей

2(533).indd 77 23.06.2017 10:20:09

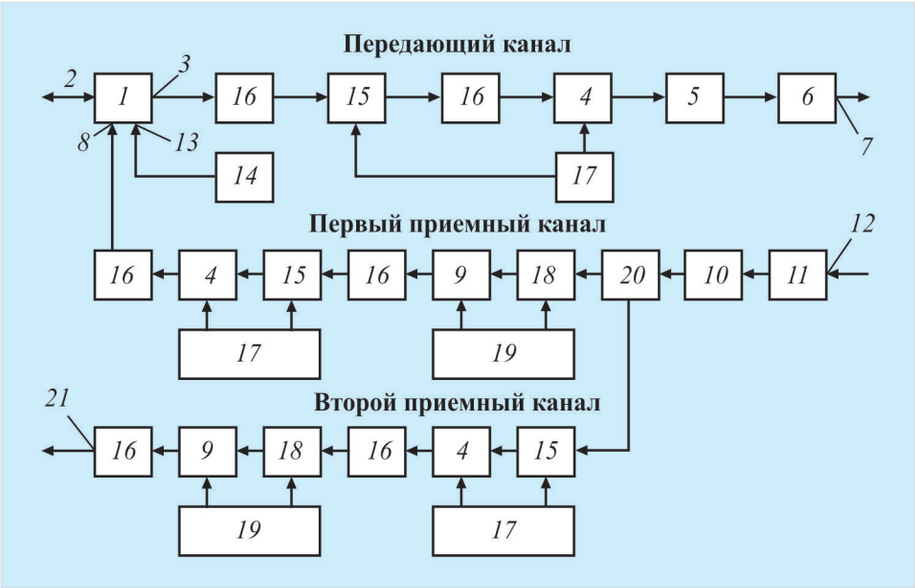


Рис. 3. Структурная схема ППМ АФАР [5]:

1 – переключатель на 2 положения «прием/передача»; *2* – контакт «вход-выход» является входом-выходом модуля; *3* – контакт «выход» в положении переключателя «передача»; *4* – *n*-разрядный фазовращатель; *5* – предварительный усилитель мощности; *6* – выходной усилитель мощности; *7* – выход передающего канала, который является выходом модуля; *8* – контакт «вход» в положении переключателя «прием»; *9* – *n*-разрядный ступенчатый аттенюатор; *10* – малошумящий усилитель; *11* – защитное устройство; *12* – вход приемного канала, который является входом модуля; *13* – второй контакт «вход» переключателя; *14* – коммутатор; *15* – дополнительный *n*-разрядный фазовращатель; *16* – согласующий усилитель; *17* – схема управления фазовращателями; *18* – дополнительный *n*-разрядный ступенчатый аттенюатор; *19* – схема управления аттенюаторами; *20* – делитель мощности СВЧ-сигнала; *21* – выход второго приемного канала

мере один управляемый *n*-разрядный фазовращатель, предварительный усилитель мощности, выходной усилитель мощности, выход передающего канала, который является выходом модуля, содержит дополнительный *n*-разрядный фазовращатель и два согласующих усилителя; при этом вход одного из усилителей соединен с контактом «выход» переключателя, а выход усилителя – с входом дополнительного *n*-разрядного фазовращателя; вход второго усилителя соединен с выходом дополнительного *n*-разрядного фазовращателя, а выход усилителя – с входом *n*-разрядного фазовращателя, а оба фазовращателя – с одной схемой управления. В свою очередь, приемный канал, состоящий из последовательно соединенных по меньшей мере одного управляемого *n*-разрядного фазовращателя, одного управляемого *n*-разрядного ступенчатого аттенюатора, одного малошумящего усилителя, защитного устройства и входа канала (который является входом модуля), содержит дополнительный *n*-разрядный ступенчатый аттенюатор, выход которого соединен с входом *n*-разрядного ступенчатого аттенюатора (аттенюаторы подключены к одной схеме управления), дополнительный *n*-разрядный фазовращатель, выход которого соединен с входом первого *n*-разрядного фазовращателя (фазовращатели подключены к одной схеме управления), два согласующих усилителя (вход одного из них соединен с выходом дополнительного *n*-разрядного аттенюатора, а выход – с входом дополнительного *n*-разрядного фазовращателя, вход второго усилителя соединен с выходом *n*-разрядного фазовращателя, а

2(533).indd 78 23.06.2017 10:20:09

выход второго усилителя – с контактом «вход» переключателя) и делитель мощности СВЧ-сигнала (вход делителя соединен с выходом малошумящего усилителя, а первый выход – с входом дополнительного *n*-разрядного ступенчатого аттенюатора).

Ко второму выходу делителя подключен второй приемный канал, содержащий последовательно соединенные *n*-разрядный и дополнительный *n*-разрядный фазовращатели, имеющие одну схему управления, *n*-разрядный и дополнительный *n*-разрядный ступенчатые аттенюаторы, имеющие одну схему управления, и два согласующих усилителя. Вход одного из усилителей соединен с выходом второго *n*-разрядного фазовращателя, а выход усилителя – с входом первого *n*-разрядного ступенчатого аттенюатора, вход второго усилителя соединен с выходом второго *n*-разрядного ступенчатого аттенюатора, а выход второго усилителя – с выходом второго приемного канала, который является выходом модуля.

При этом в каждом канале схема управления фазовращателями или аттенюаторами содержит преобразователь последовательного кода управления в параллельный код и преобразователь уровней сигналов управления.

Для удобства компоновки ППМ АФАР СВЧ-диапазона во втором приемном канале последовательность подключения фазовращателей и аттенюаторов к делителю может быть изменена. Вход *n*-разрядного ступенчатого аттенюатора соединен с вторым выходом делителя, а выход дополнительного *n*-разрядного ступенчатого аттенюатора – с входом первого согласующего усилителя; выход первого согласующего усилителя – с входом *n*-разрядного фазовращателя, выход дополнительного *n*-разрядного фазовращателя – с входом второго согласующего усилителя.

Включение параллельно с приемным каналом через делитель мощности СВЧ-сигнала второго приемного канала обеспечивает разделение принимаемого сигнала и дает возможность одновременного формирования двух приемных диаграмм направленности. Это позволяет одновременно в режиме приема увеличить угол обзора, повысить точность определения координат цели и повысить потенциал системы ППМ.

Включение в передающий и в оба приемных канала дополнительного *n*-разрядного фазовращателя и дополнительного *n*-разрядного ступенчатого аттенюатора со схемами управления, содержащими преобразователь последовательного кода управления в параллельный код и преобразователь уровней сигналов управления, дает возможность увеличить быстродействие ППМ АФАР за счет формирования в схемах управления предварительной информации кодов управления в режиме медленного обмена последовательным кодом и быстрого подключения (10…20 нс) регистров управления к СВЧ-аттенюаторам и фазовращателям. В результате уменьшается время параллельной обработки принимаемых сигналов.

Включение в схему управления аттенюаторами и фазовращателями преобразователя последовательного кода управления в параллельный код и преобразователя уровней сигналов позволяет в режиме медленного последовательного формирования кодов состояний аттенюаторов и фазовращателей заполнять регистры памяти параллельным кодом управления и по команде управляющего компьютера достаточно быстро (за время 10…20 нс) подключать регистры к схемам преобразования уровней и далее к СВЧ-фазовращателям и аттенюаторам. Таким образом, появляется возможность изменять диаграмму направленности даже от импульса к импульсу переключения «прием/передача».

Согласующие усилители в передающем и приемных каналах позволяют согласовать входы и выходы СВЧ-аттенюаторов и фазовращателей и их соединение во всех комбинациях дис-

2(533).indd 79 23.06.2017 10:20:09

кретов фаз и амплитуд и тем самым повысить точность установки фазового и амплитудного распределения, увеличить быстродействие ППМ АФАР.

Коммутатор обеспечивает преобразование входных сигналов управления ТТЛ-уровня в необходимые сигналы управления переключателем СВЧ-сигнала «прием/передача» отрицательного уровня.

3. УСТРОЙСТВО ППМ АФАР

ППМ АФАР СВЧ-диапазона содержит переключатель *1* на два положения. Контакт «вход-выход» *2* переключателя *1* является входом-выходом модуля. В положении переключателя *1* «передача» ППМ через контакт *2* подключен к внешней распределительной системе, распределяющей СВЧ-сигнал от задающего генератора на все ППМ АФАР. Когда переключатель *1* установлен в положение «передача», его контакт «выход» *3* подключен к входу передающего канала. Когда переключатель *1* установлен в положение «прием», его контакт «вход» *8* подключен к выходу приемного канала. Второй контакт «вход» *13* подключен к коммутатору *14*. Коммутатор *14* формирует сигналы управления для СВЧ-переключателя *1*, которые открывают или закрывают ключевые транзисторы, подключая к входу *2* вход *3* или выход *8*.

Вход передающего канала подключен к контакту *3*. Передающий канал содержит последовательно соединенные согласующий усилитель *16* в виде МИС на ПТШ с коэффициентом усиления +8 дБ, дополнительный 2-разрядный фазовращатель *15* (М44149, АПНТ 434830.019ТУ), согласующий усилитель *16*, фазовращатель *4*, предварительный усилитель *5*, выходной усилитель мощности *6* и выход передающего канала *7*, который является выходом модуля. Фазовращатель *4* и дополнительный 2-разрядный фазовращатель *15* подключены к одной схеме управления *17*, выполненной в виде МИС на кремниевом кристалле размерами 2,4×1,9 мм (ГПКФ.431432.00ТУ).

Выход приемного канала подключен к контакту «вход» *8* переключателя *1*. Приемный канал ППМ содержит последовательно соединенные согласующий усилитель *16*, фазовращатель *4*, дополнительный 2-разрядный фазовращатель *15*, согласующий усилитель *16*, аттенюатор *9*, дополнительный 5-разрядный ступенчатый аттенюатор *18* (М44712, АПНТ 434820.002ТУ), первый выход делителя мощности СВЧ-сигнала *20*, выполненного в виде тонкопленочной схемы на поликоровой подложке, второй выход делителя *20*, малошумящий усилитель (МШУ) *10* в виде двух последовательно соединенных МИС МШУ на основе арсенидгаллиевых эпитаксиальных гетероструктур с коэффициентом усиления +15 дБ каждый, защитное устройство *11* и вход приемного канала *12*. Фазовращатель *4* и дополнительный 2-разрядный фазовращатель *15* подключены к одной схеме управления *17* этого канала. Основной *9* и дополнительный 5-разрядный *18* ступенчатые аттенюаторы подключены к одной схеме управления *19* этого канала, выполненной на кремниевом кристалле размерами 2,4×1,9 мм (ГПКФ.431432.00ТУ).

Ко второму выходу делителя *20* подключен вход второго приемного канала. Второй приемный канал содержит последовательно соединенные 2-разрядный фазовращатель *15* и фазовращатель *4*, которые имеют одну схему управления *17*, согласующий усилитель *16*, дополнительный 5-разрядный ступенчатый аттенюатор *18* и аттенюатор *9*, имеющие одну схему управления *19*, согласующий усилитель *16* и выход второго приемного канала *21*.

При этом в каждом канале схема управления *17* или *19* содержит преобразователь последовательного кода управления в параллельный код и преобразователь уровня сигналов управления.

2(533).indd 80 23.06.2017 10:20:09

Предварительный усилитель *5* – 2-каскадный усилитель мощности на двух ПТШ, содержит все необходимые элементы согласования, питания и развязки. На входе и выходе у него стоят копланарные выводы для измерения параметров МИС на пластине. Первый каскад содержит транзистор с шириной затвора 840 мкм, который охвачен параллельной отрицательной обратной связью для стабилизации коэффициента усиления. Второй каскад содержит два транзистора с шириной затвора 1680 мкм. На выходе укороченный мост Уилкинсона осуществляет сложение мощности. Размеры кристалла – 1,8×2,1 мм, S = 3,78 мм^2.

Выходной усилитель мощности *6* – 2-каскадный усилитель мощности на ПТШ, содержит все необходимые элементы согласования, питания и развязки. На входе и выходе у него подключены копланарные выводы для измерения параметров МИС на пластине. Первый каскад содержит два транзистора с шириной затвора 1680 мкм, второй каскад – восемь транзисторов с шириной затвора 1680 мкм. В межкаскадных цепях и на выходе укороченные мосты Уилкинсона осуществляют сложение мощности. Размеры кристалла – 3,3×3,3 мм, S = 10 мм^2.

Аттенюатор *9* – 5-разрядный ступенчатый аттенюатор (М44712, АПНТ 434820.002ТУ), выполнен на ПТШ, содержит все необходимые элементы согласования, питания и развязки, а также пять последовательно включенных Т-образных переключаемых звеньев. Каждое звено соответствует одному переключаемому биту. На входе и двух выходах у него – копланарные выводы для измерения параметров МИС на пластине. Ширина затвора у переключаемых транзисторов – 300 мкм. Размеры кристалла – 2,5×1,5 мм, S = 3,8 мм^2.

Фазовращатель *4* – 5-разрядный фазовращатель (М44146-2, АПНТ 434830.009ТУ), выполнен на ПТШ, содержит все необходимые элементы согласования, питания и развязки, а также пять последовательно включенных Т-образных переключаемых фазовых звеньев. Каждое звено соответствует одному переключаемому биту. Для компенсации потерь в фазовращатель встроен компенсирующий усилитель. На входе и выходе у него – копланарные выводы для измерения параметров МИС на пластине. Ширина затвора у транзисторов – 300 мкм. Размеры кристалла – 4,3×2,2 мм, S = 9,5 мм^2.

Защитное устройство *11* (М44417, АПНТ 434820.003ТУ) выполнено на диодах с барьером Шотки, содержит все необходимые элементы согласования, питания и развязки и, кроме того, два последовательно включенных каскада защиты на встречно включенных диодах Шотки. На входе и выходе у него – копланарные выводы для измерения параметров МИС на пластине. Размеры кристалла – 1,1×0,8 мм, S = 0,9 мм^2.

Переключатель *1* – МИС-переключатель 1×2 (М44218, АПНТ 434830.010ТУ), выполнен на полевых транзисторах, содержит все необходимые элементы согласования, питания и развязки. На входе и двух выходах у него – копланарные выводы для измерения параметров МИС на пластине. На входе – два транзистора с шириной затвора 300 мкм. На каждом выходе также имеются два транзистора с шириной затвора 300 мкм, соединенных между собой фильтром нижних частот. Такое включение обеспечивает хорошую развязку между выходами устройства. Размеры кристалла – 1,85×1,28 мм, S = 2,4 мм^2.

4. РАБОТА ППМ АФАР

ППМ АФАР СВЧ-диапазона работает следующим образом.

Сигналы управления для СВЧ-переключателя *1* формирует коммутатор *14*, который подключает к входу *2* переключателя *1* вход *3* или выход *8*.

2(533).indd 81 23.06.2017 10:20:09

В режиме «передача» сигнал с выхода внешней распределительной системы подается на контакт «вход-выход» *2* переключателя *1* и через него с небольшими потерями (до 2 дБ) поступает на вход *3* передающего канала и вход согласующего усилителя *16*. Согласующий усилитель *16* усиливает сигнал и передает в дополнительный *15* и основной *4* фазовращатели, которые формируют необходимые параметры выходного сигнала передатчика. Дополнительный и основной фазовращатели управляются схемой *17*, которая формирует сигналы управления для включения их ступеней. Второй согласующий усилитель *16* компенсирует потери сигнала в фазовращателях. Предварительный усилитель *5* усиливает сигнал до мощности 500 мВт, необходимой для раскачки выходного сигнала усилителя мощности. Выходной усилитель мощности *6* является основным узлом, формирующим мощный выходной сигнал передающего канала, и имеет коэффициент усиления 10…13 дБ.

В режиме «прием» на вход приемного канала *12* поступает принимаемый антенной внешний сигнал. Сигнал поступает на защитное устройство *11*. В зависимости от мощности сигнала защитное устройство имеет разный коэффициент передачи. При входном сигнале до 2 Вт на выходе сигнал не превышает 40…50 мВт. Ослабленный сигнал поступает на малошумящий усилитель *10*, а затем, усиленный на 30 дБ, поступает на вход делителя *20*. Здесь сигнал делится на два идентичных сигнала. Один продолжает движение по первому приемному каналу, а второй – по второму приемному каналу. Приемные каналы идентичны и отличаются только выходными цепями. Сигнал в первом канале идет через дополнительный *15* и основной *4* фазовращатели, которые формируют необходимые параметры выходного сигнала. Сигнал во втором канале идет через дополнительный *15* и основной *4* фазовращатели и через дополнительный *18* и основной *9* аттенюаторы, которые формируют необходимое амплитудное распределение выходного сигнала. Согласующий усилитель *16* компенсирует потери сигнала в фазовращателях и аттенюаторах. Схема управления *17* формирует сигналы управления для включения ступеней фазовращателей *15* и *4*. Схема управления *19* формирует сигналы управления для включения ступеней дополнительного *18* и основного *9* аттенюаторов.

Выход первого канала *8* через переключатель *1* соединяется с устройством суммирования АФАР. Выход второго канала *21* всегда соединен со вторым устройством суммирования АФАР. Схемы управления *17* и *19* формируют сигналы управления для включения ступеней фазовращателей или аттенюаторов. На вход схемы *17* или *19* поступает последовательный код данных, в котором содержится информация о включаемых ступенях, и одновременно сигнал принадлежности информации к определенному каналу.

Схема *17* или *19* формирует параллельный код управления, который через преобразователь уровня поступает на соответствующую ступень, и записывает его в определенный регистр памяти. Далее по внешней команде через преобразователь уровня параллельный код поступает на соответствующие ступени фазовращателей или аттенюаторов. Коммутатор *14* получает стандартный цифровой сигнал ТТЛ- или КМОП-уровня, который, проходя через схемы формирования, преобразуется в два противофазных сигнала с отрицательным напряжением. Эти сигналы поступают на СВЧ-переключатель *1* и открывают или закрывают ключевые транзисторы, подключая ко входу *2* вход *3* или выход второго приемного канала *8*.

Предлагаемый ППМ АФАР СВЧ-диапазона позволил увеличить угол обзора на 10 %, повысить точность определения координат цели на 30 % и потенциал системы на 20 %. Причем эти увеличения происходят одновременно.

2(533).indd 82 23.06.2017 10:20:10

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной работы создан ППМ АФАР, позволяющий за счёт включения параллельно с приемным каналом через делитель мощности 2-го приемного канала обеспечить разделение принимаемого сигнала и одновременное формирование двух приемных диаграмм направленности, а значит, одновременно в режиме приема увеличить угол обзора, повысить точность определения координат цели и потенциал системы (дальность обнаружения цели) приемопередающего модуля.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Щербаков, С. В.** Проблемы унификации электронных СВЧ-компонентов твердотельных АФАР / С. В. Щербаков // Материалы 16-го координационного научно-технического семинара по СВЧ-технике. – Нижний Новгород, 2009. – С. 156.

2. Приемопередающий модуль АФАР // Новости СВЧ-техники / ФГУП «НПП «Исток». – 2004. – № 3. – С. 11 –12.

3. Монолитная схема управления сигналами ППМ АФАР // Новости СВЧ-техники / ФГУП «НПП «Исток». – 2004. – № 3. – С. 8 – 10.

4. Набор монолитных схем для АФАР *X*-диапазона фирмы Mimix // Новости СВЧ-техники / ФГУП «НПП «Исток». – 2006. – № 6. – С. 11 –12.

5. **Пат. 2454763 РФ, МПК[7] H 01 Q 21/00, H 01 Q 3/26.** Приемопередающий модуль активной фазированной антенной решетки СВЧ-диапазона / А. Г. Далингер, В. М. Малыщик, В. А. Иовдальский. – Опубл. 27.06.12, Бюл. № 018.

Статья поступила 6 октября 2011 г.

НОВЫЕ КНИГИ

ПРОСКУРИН В.И., ЯГОЛЬНИКОВ С.В., ШЕВЧУК В.И. **Радиолокационное наблюдение. Методы, модели, алгоритмы.** – М.: Радиотехника, 2017. – 368 с.: ил. (Научная серия «Конфликтно-устойчивые радиоэлектронные системы»).

Разработаны методы анализа и синтеза алгоритмов распределенной пассивно-активной локации, включающей как традиционные пассивную и активную локацию, так и активную локацию с неконтролируемыми источниками облучения обстановки. Исследованы вопросы цифровой коррекции нелинейных искажений приемного тракта, синтеза алгоритмов обнаружения большебазовых сигналов от движущихся целей, измерения координат в условиях влияния Земли на распространение сигналов.

Для научных работников, студентов и аспирантов, занимающихся теоретическими вопросами радиолокации, а также для разработчиков радиолокационной техники.

2(533).indd 83 23.06.2017 10:20:10

МЕДИЦИНСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.372.8

КОНСТРУКЦИЯ ВОЛНОВОДНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЖИДКОСТЕЙ

К. Д. Казаринов, Е. А. Тихонова, В. С. Солосин

ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

Предложена новая конструкция перестраиваемого волноводного СВЧ-резонатора, предназначенного для использования в системах измерения диэлектрических параметров сильно поглощающих жидкостей. Конструкция резонатора обеспечивает плавную регулировку связи с объектом измерения и высокую стабильность результатов измерений.

КС: микроволновое излучение, волновод прямоугольного сечения, диэлектрический капилляр, водный раствор, биологическое действие микроволнового излучения

WAVEGUIDE UNIT DESIGN FOR MEASURING LIQUID PARAMETERS

K. D. Kazarinov, E. A. Tikhonova, V. S. Solosin

FIRE named after V.A. Kotelnikov RAS

A new design of a tunable waveguide microwave resonator intended to be used in systems of measuring dielectric parameters of highly absorbing liquids has been proposed. The resonator design provides the continuous adjustment of the contact with the object of measurement and high stability of the measurement results.

Keywords: microwave radiation, rectangular cross section waveguide, dielectric capillary, water solution, biological effect of microwave radiation

1. ВВЕДЕНИЕ

При изучении первичных механизмов биологического действия микроволнового излучения мы исследовали простые биологические системы (на клеточном, мембранном и молекулярном уровнях) [1]. В процессе экспериментов с суспензиями клеток или липосом (моделями биологических клеточных мембран), а также растворами приходилось принимать сложное решение о способе микроволнового облучения биообъектов. Высокое содержание воды в наших объектах, сильно поглощающей микроволновое излучение, приводило к тому, что основная мощность излучения поглощалась в толщине образца, не превосходящей 0,3 мм. Это обстоятельство диктовало необходимость использовать в наших опытах или очень тонкие кюветы, или же обычные, но снабженные механической мешалкой. Понятно, что в последнем случае снимался вопрос о неравномерности микроволнового облучения объекта, появлялась возможность надежного термостатирования и контроля состояния объекта непосредственно

2(533).indd 84 23.06.2017 10:20:10

в процессе облучения, например контролировать кислотность среды (pH), температуру, светорассеяние и т. д. Следует заметить, однако, что эффективность облучения в такой ситуации оказывается достаточно невысокой. По этой причине приходилось искать такой способ микроволнового облучения, при котором весь объект находился бы в поле излучения и в то же время можно было бы контролировать его состояние.

Принцип традиционных резонансных методов состоит в сравнении резонансной частоты и добротности резонатора, измеренных сначала без исследуемого образца, а затем с образцом, помещенным в полость резонатора [2]. Основным ограничением, которым приходится руководствоваться при выборе конструкции и размеров резонатора, а также способа введения диэлектрического образца в резонатор, является условие квазистационарности. При нарушении условий квазистационарности размеры системы могут оказаться сравнимыми с длиной волны электромагнитного излучения и учет «полезного» сигнала на фоне «паразитных» параметров может оказаться невозможным.

Для решения поставленной задачи обычно пользуются методом малых возмущений [3], который дает возможность установить связь между мощностью, поглощаемой внутри полости резонатора, и энергией, поступающей в эту полость в единицу времени.

В дальнейших исследованиях было показано, что цилиндрические резонаторы недостаточно привлекательны для исследований диэлектриков с большими потерями, вследствие значительного возмущения поля. Эта проблема была решена при использовании колебаний основного типа, что позволило анализировать образцы значительно большего диаметра и с большими потерями при отсутствии возмущения поля. Возможность перестройки цилиндрического резонатора с помощью подвижного поршня можно отнести к основным достоинствам режима основного типа колебаний. Использование перестраиваемого резонатора существенно расширяет возможности метода для анализа широкого круга диэлектриков и повышает чувствительность метода и точность измерений.

2. ИЗУЧЕНИЕ ИЗВЕСТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ВОЛНОВОДНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ЯЧЕЕК

Известны конструкции устройств для измерения поглощения жидкостью в диэлектрическом капилляре электромагнитного излучения микроволнового диапазона. В устройстве, предложенном в работе [4], измерительная кювета с рабочим веществом выполнена в виде капилляра с электродами, вмонтированными в его торцы и соединенными с синхронным детектором. При этом капилляр устанавливается при настройке параллельно вектору плоскости поляризации электрического поля микроволнового излучения. Уровень поглощения микроволнового излучения жидкостью в капиллярной трубке определяется в данном случае по изменению электропроводности жидкости.

Недостатком данного метода является необходимость использования открытого резонатора, который не позволяет сконцентрировать микроволновое излучение в такой же степени, как закрытый металлический волновод. Следовательно, имеют место потери энергии излучения, приводящие к снижению чувствительности измерений поглощения.

Конструкцией измерительного устройства, более близкого к предлагаемому, является капиллярная кювета, представляющая собой тонкостенную тефлоновую трубку в волноводе, которая использовалась для исследования водных растворов [5]. Недостатком данной конструкции, по

2(533).indd 85 23.06.2017 10:20:10

сравнению с предложенной, является отсутствие возможности подстройки резонансной системы, что препятствовало использованию данного устройства для измерения диэлектрических характеристик широкого ряда сильно поглощающих жидкостей.

Наиболее близкой к предлагаемому устройству является конструкция резонатора, отличающаяся возможностью перестройки геометрических размеров широкой стенки волновода, в виде поршней с отверстиями для диэлектрической капиллярной трубки, в которую помещена измеряемая жидкость [6]. Измерение диэлектрических характеристик жидкостей с помощью данного устройства выполняется следующим образом. В радиопрозрачный капилляр, пронизывающий широкую стенку металлического прямоугольного волновода, наливается исследуемая жидкость. Затем с помощью подвижных поршней добиваются максимального значения добротности резонаторной измерительной системы, что регистрируется по величине амплитуды резонансной кривой на экране. Разность амплитуд резонансной кривой при последовательных измерениях показывает изменение концентрации вещества в бинарной или же многокомпонентной исследуемой жидкости, связанное с изменением величины диэлектрической проницаемости. Более высокая чувствительность измерений наблюдается при измерениях уровня сигнала на склоне резонансной кривой. В этом случае оценивается смещение пика резонансной кривой по шкале частот, что повышает чувствительность измеряемого параметра жидкости, связанного также с изменением величины диэлектрической проницаемости.

Перемещение поршней перпендикулярно плоскости широкой стенки волновода осуществляется с помощью регулировочных винтов. Несмотря на высокие технические характеристики устройства, его работа отличается крайней нестабильностью, связанной с механической неустойчивостью элементов конструкции, что приводило к нестабильности результатов измерения амплитуды резонансной кривой отраженного СВЧ-сигнала.

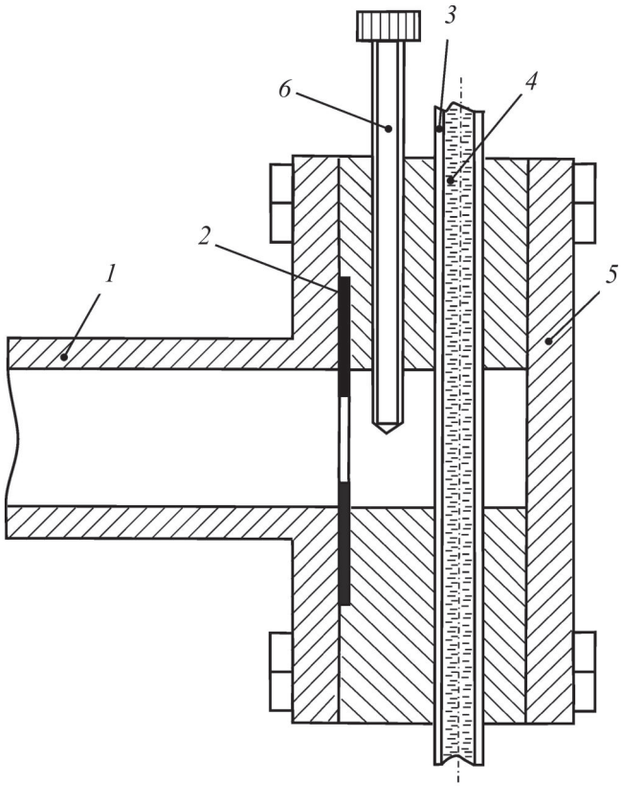
3. ПРЕДЛАГАЕМАЯ КОНСТРУКЦИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЯЧЕЙКИ

Получаемый при использовании предлагаемого нами устройства технический результат заключается в уменьшении искажения формы резонансной кривой отраженного СВЧ-сигнала за счет улучшения контакта контролируемой жидкости, помещенной в диэлектрический капилляр, с волноводным измерительным устройством, что приводит к повышению точности и чувствительности измерений.

Достигается это тем, что волноводное устройство (рисунок) выполняется разъемным. Прилегающая к фланцу волноводного тракта вставка содержит резьбовое гнездо для емкостного штыря, который представляет собой цилиндрический проводник, установленный по направлению силовых линий напряженности электрического поля E и соединенный одним концом с широкой стенкой волновода. При некоторой длине штыря, близкой к $\lambda_0/4$, проводимость последовательного контура обращается в бесконечность и волновод закорачивается. Между вставкой и фланцем волновода имеется неглубокая канавка, вдоль которой может перемещаться полоска тонкого металла в виде резонансной (индуктивно-емкостной) диафрагмы. Размеры и расположение диафрагмы выбираются таким образом, чтобы в волноводном устройстве получить взаимное уничтожение волн, отраженных от конца волновода и от диафрагмы. Волноводная вставка содержит сквозное отверстие для диэлектрической трубки, в которую заливается измеряемая жидкость. Гладкая пластина закрывает сквозное отверстие волновода и является короткозамыкателем тракта. За счет перемещения тонкой диафрагмы, а также емкостного штыря

2(533).indd 86 23.06.2017 10:20:10

добиваются максимального значения добротности резонаторной измерительной системы, что регистрируется по величине амплитуды резонансной кривой на экране. Разность амплитуд резонансной кривой при последовательных измерениях показывает изменение концентрации вещества в исследуемой жидкости, связанное с изменением величины диэлектрической проницаемости. Таким образом, предложены регулировочные элементы, совместное действие которых обеспечивает максимальную добротность резонатора для каждой концентрации вещества в исследуемой жидкости и стабильность результатов измерений диэлектрических параметров контролируемой жидкости.



Конструкция перестраиваемой волноводной диэлектрической камеры:
1 – волновод СВЧ-тракта; *2* – резонансная (индуктивно-емкостная) диафрагма;
3 – диэлектрическая трубка с измеряемой жидкостью *4*; *5* – короткозамыкающая пластина;
6 – емкостный штырь

Измерение диэлектрических характеристик жидкостей с помощью данного устройства выполняется следующим образом. В диэлектрический капилляр *3* (см. рисунок), пронизывающий широкую стенку металлического прямоугольного волновода *1*, наливается исследуемая жидкость *4*. Затем с помощью настроечных элементов: резонансной диафрагмы *2* и емкостного штыря *6* – добиваются максимального значения добротности резонаторной измерительной системы, что регистрируется по величине амплитуды резонансной кривой на экране. Разность амплитуд резонансной кривой при последовательных измерениях показывает изменение концентрации вещества в исследуемой жидкости, связанное с изменением величины диэлектрической проницаемости. Более высокая чувствительность измерений наблюдается при измерениях уровня сигнала на склоне резонансной кривой. В этом случае оценивается смещение

2(533).indd 87 23.06.2017 10:20:11

пика резонансной кривой по шкале частот, что повышает чувствительность измеряемого параметра жидкости, связанное также с изменением величины диэлектрической проницаемости.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, предлагаемое техническое решение позволяет использовать регулировочные элементы, совместное действие которых обеспечивает максимальную добротность резонатора для каждой концентрации вещества в исследуемой жидкости и повышение чувствительности результатов измерений диэлектрических параметров контролируемой жидкости. Кроме того, упрощается конструкция устройства за счет исключения настроечных поршней с дифференциальными винтами, фторопластовыми шайбами, зубчатыми колесами и спиральными пружинами, уменьшаются габаритные размеры устройства и его масса в несколько раз и, следовательно, должна снижаться себестоимость измерительного узла.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Казаринов, К. Д.** Роль клеточных мембранных систем в рецепции электромагнитных полей КВЧ-диапазона биологическими объектами / К. Д. Казаринов // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2008. – Вып. 1 (494). – С. 42 – 55.

2. **Брандт, А. А.** Исследования диэлектриков на сверхвысоких частотах / А. А. Брандт. – М.: Физматгиз, 1963. – 403 с.

3. **Гвоздовер, С. Д.** Теория электронных приборов сверхвысоких частот / С. Д. Гвоздовер. – М.: Гостехиздат, 1956. – 527 с.

4. **А. с. 1432394 SU** / Е. А. Виноградов, Н. А. Ирисова, А. М. Прохоров и др. – Опубл. 23.10.1988, Бюл. № 39.

5. **А. с. 1307315 СССР, МКИ G 01 N 22/00.** Измерительный СВЧ-резонатор для диэлектриков с большими потерями / Е. В. Беляков, А. Храпко. – Опубл. 1987, Бюл. № 16.

Статья поступила 10 марта 2017 г.

2(533).indd 88 23.06.2017 10:20:11

ИСТОРИЯ

УДК 621.37/39(09)

ЗАГРАНИЦА НАМ ПОМОЖЕТ

Р. М. Попов

АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино

Показано состояние радиопромышленности в Западной Европе и становление ее в России с момента изобретения А. С. Поповым радио и до рождения завода «Радиолампа». Рассмотрены этапы активного освоения опыта зарубежных фирм, и прежде всего американской радиофирмы RCA.

КС: радио, аппаратура связи, радиоустройства, радиолампа, сотрудничество, радиопромышленность

ABROAD WILL HELP US

R. M. Popov

JSC «RPC «Istok» named after Shokin», Fryazino

The state of the radio industry in Western Europe and its formation in Russia since the invention of A. S. Popov radio and before the birth of the factory "Radiolamp" is shown. The stages of active assimilation of the experience of foreign firms and first of all the American radio company RCA have been considered.

Keywords: radio, communication equipment, radiolamp, cooperation, radio industry

С сегодняшних позиций очевидно, что изобретение в 1895 г. А. С. Поповым радио было жизненно необходимо как для оснащения радиосредствами военно-морского флота и сухопутных войск, так и для гражданского применения. К сожалению, ни русское правительство, ни деловые круги России не смогли вовремя осознать значимость изобретения своего соотечественника и способствовать развитию нового вида связи.

В отличие от России, в странах Западной Европы и в США была развёрнута активная деятельность по производству и использованию первых образцов радиоаппаратуры. Инженерные и научные достижения, предпринимательский талант зарубежных исследователей Э. Дюкрете, Г. Маркони, В. Сименс, К. Браун и др. способствовали широкому распространению беспроволочного телеграфа во всём мире, в том числе и в России, где при попытках использовать изобретение А. С. Попова не удалось продвинуться дальше кустарного производства. Поэтому, не имея собственной развитой научной и производственной базы, приходилось вынужденно ориентироваться на заграничных поставщиков.

Первой компанией, с которой в 1899 г. заключили контракт на поставку приборов по системе А. С. Попова, была французская фирма Дюкрете. Но при закупке у зарубежных поставщиков оборудования возникал ряд проблем: зависимость выполнения военных заказов от иностранных государств, срыв сроков поставок, отток из страны огромных денежных средств. Так, в период

2(533).indd 89 23.06.2017 10:20:11

с 1906 по 1908 гг. на закупку иностранного радиооборудования для русского флота было потрачено более миллиона рублей. Несмотря на эти проблемы, деятельность иностранных компаний в России в то время оценивается историками положительно. Во-первых, удалось наладить регулярное снабжение флота и армии радиоаппаратурой. Во-вторых, использование производственного опыта таких известных иностранных компаний, как «Телефункен», фирмы «Сименс и Гальске», фирмы Маркони и др., привлечение их специалистов для производства и обслуживания новой техники способствовало становлению отечественной радиопромышленности. Так или иначе, к 1917 г. основы российской радиопромышленности были заложены. К этому времени свыше 80 % иностранного капитала было направлено в совместные предприятия, учрежденные по российскому уставу. Так, если в период с 1869-го по 1896 год в России было зарегистрировано всего 71 иностранное предприятие, то к началу XX века, по официальным данным, в стране насчитывалось 136 предприятий, созданных иностранными предпринимателями. К 1914 году в Российской империи их действовало свыше 300. При этом 170 из них были учреждены в период с 1901-го по 1913 год. Активную роль иностранные инвесторы играли в деятельности более 1000 совместных предприятий.

В области радиотехники до 1917 г. в России действовало 17 предприятий, из них: основанный в 1853 г. Петербургский завод акционерного общества «Сименс и Гальске» (в советское время завод № 210 имени Козицкого); в 1889 г. – предприятие петербургского предпринимателя Я. М. Айваза (завод № 211 «Светлана»); в 1895 г. – «Электромеханический и телеграфный завод Н. К. Гейслер и Ко» (завод № 209 имени А. А. Кулакова); в 1897 г. – Петербургский телефонный завод акционерного общества Эриксон (завод № 628 «Красная заря»); в 1900 г. – Радиотелеграфный завод Морского ведомства (завод № 208 имени Коминтерна); 1907 г. – Московский телефонно-телеграфный завод (Московский электромеханический завод (МЭЛЗ) № 203 имени Г. К. Орджоникидзе); в 1908 г. – Петербургский завод акционерного «Русского общества беспроволочных телеграфов и телефонов» (завод № 327 имени М. В. Фрунзе); в 1917 г. – Нижегородский завод акционерного общества «Сименс и Гальске» (Горьковский радиозавод № 197 имени В. И. Ленина).

За годы первой мировой войны западно-европейская техника связи шагнула далеко вперед. В Советской России, лишенной какой-либо иностранной помощи, в 1918 – 1922 гг. никаких серьезных разработок в области средств связи не велось. Переживавшие тяжелейший кризис (снабженческий, производственный, кадровый) немногочисленные отечественные предприятия, специализировавшиеся на производстве средств связи и в большинстве своем располагавшиеся в Петрограде, в конце 1921 – начале 1922 года были объединены в составе Электротехнического треста заводов слабого тока (ЭТЗСТ). Вот что писал о том периоде учёный в области ВЧ-техники, член-корреспондент АН СССР В. П. Вологдин: «Технический персонал почти отсутствует, а тот, который остался, не верит в государственную промышленность и разбит на ряд групп, не связанных ничем, кроме недоверия к тресту. Эти группы являются остатками прежних фирменных организаций. Русские радиотехники рассеяны по десятку не трестовских организаций».

Перед руководством созданного треста, помимо необходимости восстановления разрушенного производства, остро стояла задача реконструкции промышленности, с тем чтобы поднять технический уровень производства и выпускаемой продукции до достигнутого промышленностью средств связи передовых стран. Естественным представлялся путь снова об-

2(533).indd 90 23.06.2017 10:20:11

ратиться за помощью к ведущим зарубежным электротехническим компаниям. Тем более, что опыт такого сотрудничества имелся.

Попытки руководства ЭТЗСТ выйти на контакты с иностранными фирмами относятся к началу 1922 г. Одна из первых программ советского правительства по участию германской компании «Телефункен» в организации радиопромышленности в Советской России стартовала в начале апреля 1922 г., когда Политбюро выделило на реализацию мер «промышленной помощи» сумму в 10 млрд руб., сравнимую с затратами на помощь голодающим. Деньги были перечислены «Межрабпому» – международной «надпартийной» организации, учрежденной для создания «тысяч каналов» революционной пропаганды. Политбюро представляло дело так, что передает госсобственность не капиталистам-эксплуататорам, а пролетариям, помогающим строить социализм, но на самом деле пропагандистские цели кампании превалировали над экономическими. 6 июня 1922 г. концессионный комитет выносит решение о недопустимости участия иностранных компаний в радиостроительстве России. Так одна из первых попыток привлечения иностранцев к восстановлению хозяйства страны не увенчалась успехом.

Однако к весне 1923 г. у руководства ЭТЗСТ всё же сложилось твердое убеждение в необходимости скорейшего заключения полноценного договора с крупной иностранной фирмой о технической помощи и начале модернизации в стране радиотехнической отрасли. Такая позиция руководства треста нашла поддержку и у центральных органов.

В апреле 1923 г. делегация ЭТЗСТ отправилась в заграничную командировку. В ходе поездки делегаты имели возможность ознакомиться с работой крупных предприятий, провести переговоры с представителями компаний «Телефункен» в Германии и «Маркони» в Великобритании. Но германская фирма от заключения договора уклонилась. Фирма «Маркони» согласилась оказать техническую помощь советской стороне, однако запрошенная ею цена была чрезвычайно высокой. И только во Франции советские представители нашли заинтересованность со стороны Французской генеральной радиотелеграфной компании. 31 июля 1923 г. между трестом и французской фирмой был заключен договор о технической помощи сроком на пять лет (1923 – 1928 гг.). Он предусматривал оказание с французской стороны технического содействия тресту в организации радиотехнического производства в СССР, изготовлении аппаратов для радиостанций, использовании в СССР патентов компании, а также командировки во Францию специалистов треста для полного ознакомления с радиопроизводством на заводах, радиостанциях и в лабораториях компании.

За время действия договора французская сторона предоставила ЭТЗСТ более 54 тыс. чертежей, различные радиоустройства, радиолампы и приспособления для их производства. Кроме того, через трест было подано 38 заявок на изобретения, на которые было выдано несколько патентов. Причем отдельные из них представляли большую ценность и были немедленно взяты на вооружение специалистами треста.

Большое значение имели и командировки французских специалистов на советские предприятия, особенно на начальном этапе сотрудничества, когда их непосредственная помощь в деле организации современного радиопроизводства была незаменима. Не менее важными были командировки отечественных специалистов на предприятия и в лаборатории Французской генеральной компании. Это давало им возможность на месте ознакомиться с последними достижениями французских партнеров и оперативно внедрять их в СССР.

Несмотря на то, что договор ЭТЗСТ с французской фирмой от 21 августа 1923 г. был утвержден СНК СССР, на протяжении 1923 – 1925 гг. он являлся объектом критики со стороны целого

2(533).indd 91 23.06.2017 10:20:11

ряда видных сотрудников Нижегородской радиолаборатории – сторонников самостоятельного пути развития отечественной радиотехники. Дело доходило до того, что в письме на имя И. В. Сталина за подобное сотрудничество руководство ЭТЗСТ, и в частности В. П. Вологдин, обвинялись, ни много ни мало, в контрреволюционности. В святи с этим договор стал предметом обследования двух комиссий, в состав которых были включены члены правительства, руководители промышленности и ученые. Обе комиссии отвергли все обвинения в адрес ЭТЗСТ и его руководителей и признали договор выгодным для государства.

Техническая помощь Французской компании обошлась советской стороне почти в полмиллиона рублей. Кроме этого, по условиям договора у фирмы было приобретено радиоизделий на сумму более 19 тыс. долл. и 2,5 млн франков. Отечественные специалисты, причастные в то время к организации производства на предприятиях ЭТЗСТ, единодушны в оценке исключительной важности полученной помощи. Например, главный инженер Электровакуумного завода С. А. Векшинский, отмечал, что «...помощь французов дала нам готовые лампы, разработка которых потребовала бы большого времени... В области усилительных ламп помощь французов позволила сдвинуть вопрос с мертвой точки, показала новые технологии». Комиссия Военно-технического управления РККА, инспектировавшая Электровакуумный завод в Ленинграде в декабре 1926 г., также подчеркивала в своем заключении, что среди важнейших достижении треста является «совершенно верно поставленное, европейски оборудованное производство ламп». А председатель правления треста П. П. Жуков на страницах газеты «Правда» писал: «Техническая помощь дала нам возможность освободиться от необходимости предварительных кропотливых, дорогостоящих и далеко не всегда заканчивающихся успехом лабораторных и заводских изысканий и приступить непосредственно к выполнению в мастерских к назначенным срокам принятых заказов. Она дала нам возможность организовать быстрым темпом наше производство в области радио, загрузить наши заводы, принять новые заказы с близкими сроками выполнения».

В результате иностранной технической помощи трест наладил с 1924 г. производство совершенно новых для СССР типов ламповых передатчиков, приемной аппаратуры и радиоламп. Сначала это было копирование французских образцов, но затем разработки треста стали принимать самостоятельный характер. Успех первого опыта сотрудничества между советским государственным электрослаботочным объединением и французской частной фирмой способствовал активизации других зарубежных компаний к установлению выгодных контактов с советской стороной.

Для отечественной радиопромышленности расширение сотрудничества, помимо технических выгод, было крайне важным и с точки зрения приобретения источников финансовых средств для своего развития. Об этом последнем обстоятельстве красноречиво свидетельствуют проекты создания совместных концессионных обществ, составленные в 1923 – 1925 гг. Первый из таких проектов относится к августу 1923 г. Он предусматривал создание совместного общества на основе капиталов ЭТЗСТ и германской фирмы «Телефункен» с целью организации строительства широкой радиосети, начиная с радиоцентра в Москве и заканчивая многотысячной сетью радиостанций в районных центрах СССР. Для этого совместное общество предоставляло кредит в несколько миллионов золотых рублей, которые оно, в свою очередь, должно было получить от «Телефункен». Альтернативные этому проекты были составлены в феврале 1924 г. с участием английской фирмы «Маркони» и «Французской генеральной компании». Но в результате многочисленных переговоров ни один из проектов так и не был реализован.

2(533).indd 92 23.06.2017 10:20:11

В 1928 г., имея договора о техническом сотрудничестве с фирмами «Эриксон» и «Телефункен», руководству ЭТЗСТ, несмотря на сложные политические отношения между СССР и США, удалось установить связи с некоторыми американскими компаниями. Так, с фирмой «Радиокорпорейшн» (RCA) был подписан безвозмездный договор о взаимном обмене информацией в области радиотехники, а в обмен на выданный фирме заказ в размере 600 тыс. долл. она предоставляла тресту техническую помощь по фототелеграфной аппаратуре. С французской фирмой «Тесафи» (бывшей Французской генеральной радиотелеграфной компанией) новый договор был заключен в июне 1929 г. Как и в случае с «Радиокорпорейшн», это не был полноценный договор о технической помощи. Он предусматривал обмен технической документацией по новейшим радиоустановкам, обмен патентами и правами использования их, а также предоставлял сторонам право командировать небольшое число своих специалистов на предприятия и в лаборатории партнеров. В результате от «Тесафи» было получено большое количество материалов, хотя и содержащих в значительной степени всего лишь идеи новых разработок, тем не менее, позволивших отечественной промышленности по некоторым направлениям радиотехники добиться большого и быстрого прогресса. Большую пользу принесли и командировки советских специалистов во Францию. Так, С. А. Векшинскому удалось изучить на предприятиях фирмы технологию производства усилительных ламп с бариевым катодом и внедрить ее на заводе «Светлана». Известная фирма «Филипс» за информацию подобного рода требовала от советской стороны около 1 млн долл.

К началу 1930 г. ЭТЗСТ поддерживал договорные отношения с пятью компаниями. Последовавший затем этап многочисленных реорганизаций системы управления электрослаботочной отраслью, во многом отразивший новые тенденции в ходе проведения форсированной индустриализации, привел в конечном итоге к существенному сворачиванию технического сотрудничества. На рубеже 1-й и 2-й пятилеток в научно-технической политике центральных органов советской промышленности начинает просматриваться тенденция – опора преимущественно на свои силы, стремление к обеспечению максимальной самостоятельности во всех областях науки, техники и производства.

Если оценивать развитие отечественной промышленности средств связи в 1920 – 1930-е годы, то следует сказать, что в этот период оно происходило под сильным влиянием иностранной научно-технической и производственной помощи. Не всегда качество этой помощи определялось позицией западных электротехнических концернов, но и теми процессами, которые происходили в недрах управления советской промышленностью.

За десять лет в период с 1923 – 1933 гг. в области радиопромышленности наибольшее количество договоров было заключено и действовало в 1929 – 1931 гг., после чего наступило их значительное сокращение. Так, если в 1931 г. их было 12, то в 1932 г. – 9, на начало 1933 г. – 7, а к концу 1933 г. – 5. Когда в 1931 г. стали заметны признаки свертывания сотрудничества с иностранными фирмами, в мае было принято постановление Политбюро ЦК ВКП(б) о пересмотре договоров о технической помощи. В нем говорилось об их низкой эффективности, постоянных переплатах и обогащении иностранных фирм. В начале 1932 года со стороны ВСНХ к руководству Всесоюзного электрослаботочного объединения (ВЭСО), в которое в 1931 году был преобразован ЭТЗСТ, начались настойчивые требования о сворачивании тех договорных отношений, которые не сулили существенного и быстрого эффекта. Следствием этих требований стало, например, расторжение договора с фирмой «Телефункен» в феврале 1931 г. по передаче образцов радиоламп, несмотря на протесты руководителей ВЭСО.

2(533).indd 93 23.06.2017 10:20:12

Осозание руководством Народного комиссариата по военным и морским делам (НКВМ) и ВЭСО «ненормальности» положения с развитием радиотехнической отрасли стало основной причиной созыва в Ленинграде в мае 1932 г. конференции «по обсуждению вопросов второй технической пятилетки в области военной связи». В резолюции конференции особо подчеркивалось, что одной из основных причин отставания отечественной радиотехники от иностранной является «…необеспеченность необходимых темпов ее развития со стороны производства электровакуумных приборов. Имеет место разрыв между теоретическими выводами и практическими возможностями их быстрой реализации...»

В своем докладе на конференции С. А. Векшинский сделал неутешительные выводы: «…Отставание теоретических разработок радиоламп отечественными специалистами от аналогичных иностранных образцов составляет от шести месяцев до одного года, что связано со слабой технической оснащенностью процесса реализации этих разработок в производстве. В результате отставание отечественных серийных электровакуумных приборов от иностранных достигает уже двух-трех лет. Таким образом, завод «Светлана», как головное предприятие советской электронной промышленности, в своем настоящем состоянии не способен заниматься разработкой новых современных изделий и тем более не способен организовать их массовое производство».

По результатам обсуждения доклада, конференция выработала комплекс мер, направленных на скорейшее исправление создавшегося положения в электровакуумном производстве. Правлению ВЭСО было рекомендовано в кратчайшие сроки провести работы по организации на заводе «Светлана» отраслевой вакуумной лаборатории (ОВЛ), оборудованию ее современной техникой, обеспечению подготовленными кадрами и созданию условий для ликвидации отставания от иностранной техники уже в течение первого года второй пятилетки. Кроме этого, были выработаны рекомендации по разработке конкретных типов радиоламп, необходимых для дальнейшего развертывания производства радиотехники как общехозяйственного, так и специального назначения. Наличие собственной научно-исследовательской базы, однако, отнюдь не означало изоляцию от передовой иностранной научно-технической мысли. Конференция особо подчеркнула важность самого тесного взаимодействия с заграницей, получения научно-технической помощи путем ускоренного обеспечения основных лабораторий импортными образцами, полуфабрикатами, материалами, литературой.

Сам Векшинский был активным сторонником и инициатором тесных научно-технических производственных связей с иностранными фирмами. Однако ему приходилось прилагать значительные усилия, чтобы довести до руководства свою озабоченность состоянием электровакуумного производства. Вспоминает один из сотрудников Центральной радиолаборатории З. И. Модель: «...Обсуждая перспективы развития мощных генераторных ламп, С. А. Векшинский и С. А. Зусмановский неоднократно жаловались мне, что руководство советской промышленностью считает производство электровакуумных приборов лишь небольшой и маловажной отраслью электропромышленности, притом предъявляющей излишне много специфических требований». Именно по настоянию Векшинского в качестве основного партнера была избрана американская многоотраслевая компания RCA. Налаживанию отношения с ней благоприятствовало и улучшение отношений между СССР и США, следствием чего стало установление дипломатических отношений между двумя странами в ноябре 1933 г. И в этом же году С. А. Векшинский направляется на завод фирмы RCA в Камдене с целью закупки технологического оборудования для электровакуумного производства «Светланы».

2(533).indd 94 23.06.2017 10:20:12

После возвращения из Америки он продолжает доказывать, что интересы динамичного развития радиотехнической отрасли настоятельно требуют наличия полномасштабного договора о технической помощи хотя бы с одной из крупных западных компаний. Его поддерживает и руководство образованного в составе НКТП в 1933 году Главного управления электрослаботочной промышленности (Главэспром). В записке, направленной управлением в Ленинградский обком ВКП(б), отмечалось, что «...отставание в области вакуумной техники является особо решающим и особо тормозящим развитие всей техники связи…».

Главэспромом был разработан план получения технической помощи по радиотехнике и телевидению от известной во всем мире, крупнейшей американской компании RCA. Компания являлась основным производителем массовой радиопродукции в США. Она выпускала около 30 типов радиоприемников высокого качества. В 1935 г. изготовила 25 млн радиоламп, что составляло 30 % от общемирового объема. В разработке имелось еще около 80 новых типов. Фирма сотрудничала с более чем 60 смежниками – заводами, поставлявшими ей различные блоки и детали. В феврале 1935 года ЦК ВКП(б) одобрил план Главэспрома.

30 сентября председатель «Амторга» И. В. Боев направляет в Наркомвнешторг СССР докладную записку с проектом соглашения с американской корпорацией RCA по организации технической помощи советской радиопромышленности. (Принадлежавшая СССР американская фирма «Амторг» сыграла важнейшую роль в нормализации отношений между СССР и США. Она на протяжении многих лет, пока Америка не признавала Советскую Россию, была посольством, торгпредством и коммерческим предприятием в одном лице.) В записке сообщалось, что в соглашение будет включено всё поле деятельности американской радиокомпании и её вспомогательных отделений, как производственных, так и экспериментальных. Она предоставит советской радиопромышленности свой опыт, чертежи, своих инженеров и механиков, допустит советских инженеров на заводы и лаборатории компании. Со своей стороны, советские организации должны дать инженерам радиокомпании полную возможность познакомиться с работой в СССР в объеме, согласованном в договоре. Учитывая передачу информации, чертежей, описаний и т. д. и всякие другие услуги, оказанные сотрудниками американской радиокомпании и ее подсобными организациями, изготовление и передачу данных, а также предоставляемые патенты и права, советская сторона уплатит в течение действия соглашения компенсацию в размере 2,9 млн долл. Окончательное соглашение заключается с 30 сентября 1935 г. по 31 декабря 1940 г. В заключение в записке сказано, что если вышеизложенное приемлемо как основа соглашения, наши представители смогут встретиться для обсуждения окончательного текста.

В декабре 1935 г. договор о технической помощи между Главэспромом и RCA был заключен. Этим договором, в частности, предусматривалось:

а) командировки инженеров и квалифицированных рабочих в Америку на предприятия фирмы RCA для изучения технологии производства непосредственно на рабочих местах сроком на 6 и более месяцев группами по 20…25 человек;

б) изучение всей технической документации – технологической и конструкторской, относящейся к серии металлических радиоламп, например 6Q7, 6A8, 6L6, 6X6, а также к серии среднегенераторных радиоламп;

в) изучение работы технологического оборудования по производству радиоламп, а также испытательного и заготовительного оборудования;

г) отбор и закупка наиболее современного, технически совершенного, высокопроизводительного и перспективного оборудования и приспособлений;

2(533).indd 95 23.06.2017 10:20:12

д) закупка большого количества деталей для производства радиоламп на первый период освоения их на предприятиях Советского Союза;

е) проверка всей технологической документации и отправка ее на предприятия Советского Союза. Документация фирмы хорошо отработана и при добросовестном ее соблюдении выход приборов достигает 80 % и более;

и) командирование американских специалистов фирмы RCA на предприятия Советского Союза для оказания помощи на месте.

В соответствии с договором, 10 марта 1936 г. в Нью-Йорк прибыла первая группа инженеров и мастеров из 53 человек. Все они предварительно прошли проверку соответствующими органами. Каждый выдвинутый хозяйственными и местными партийными организациями сотрудник проверялся специально заведующими секторами промышленного отдела ЦК ВКП(б) в Ленинграде и в Москве, с последующей проверкой их через органы НКВД.

Отобранные работники затем были вызваны в ЦК ВКП(б) и принимались заместителем заведующего промышленного отдела ЦК. Кроме того, со всеми намеченными к отъезду было проведено секретарем ЦК ВКП(б) по кадровой политике, генеральным комиссаром госбезопасности Н. И. Ежовым специальное совещание.

В этой группе от завода «Радиолампа» было 8 человек: главный инженер завода К. Б. Романюк; начальник производства В. Н. Черноусов; начальник ОТК А. А. Сорокин; начальник инструментального цеха А. К. Волков; начальник цеха генераторных ламп А. И. Махновский; зам. начальника цеха Г. И. Шишкин. Инициалы и должности Гальдина и Аделя установить не удалось.

Перед отъездом всех приодели. Дело в том, что в отечественной обычной одежде выезжать за границу было просто неприлично. Поэтому всех командировочных направляли в специальные закрытые магазины или даже к специальным портным, и там их «одевали». Вся эта одежда, изготовленная из более или менее одного и того же материала, шляпы и галстуки одного фасона, конечно, превращали всех командировочных в стандартную, довольно мешковатую фигуру, которую легко можно было различать в толпе.

О командировке в Америку в конце 1936 г. вспоминает почетный работник электронной промышленности, сотрудник завода «Светлана» П. А. Деньга. Он был в составе третьей группы, направленной на фирму RCA, в которой также значились 3 сотрудника завода «Радиолампа», имена которых установить не удалось.

«…Скорый поезд «Москва – Столбцы» доставил нас до пограничной станции «Негорелов» (первая пограничная станция – ворота в страны Западной Европы и Америки. – *Р. П.*). После таможенных проверок на пограничных пунктах экспресс «Столбцы – Париж», пересекая территорию Польши, Германии и Бельгии, доставил нашу группу в Париж. Конечно, знакомство, даже из окон вагона, с территорией и городами этих европейских государств представляло большой интерес.

Недельное пребывание в Париже в ожидании очередного рейса теплохода из порта Гавр в Нью-Йорк позволило нашей группе в экскурсионном порядке ознакомиться со всеми историческими местами Парижа, которые были известны нам по романам Виктора Гюго, посетить Лувр с его шедеврами искусства, Версаль с его помпезными дворцами и парками. Пешеходные экскурсии по многочисленным площадям Парижа, Монмартру, Елисейским полям, набережным Сены позволили расширить наши познания о столице Франции и парижанах.

Французский теплоход «Лафайет», покинув порт Гавр, после захода в английский порт Пли-

2(533).indd 96 23.06.2017 10:20:12

мут должен был пересечь Атлантический океан и на седьмые сутки доставить нас в Нью-Йорк. Однако разыгравшийся, редкий по мощности шторм, достигавший 11…13 баллов, притормозил скорость движения теплохода, и он прибыл в Нью-Йорк с опозданием на двое суток... По приближении к американскому материку нашему взору открылся почти фантастический вид на нижнюю часть Нью-Йорка – Манхэттен, плотно застроенную серыми многоэтажными небоскребами разных конфигураций, устремленных ввысь.

В порту нас встретили представители «Амторга». Нью-Йорк вначале произвел на нас удручающее впечатление. Неуютность и загрязненность портовой части города, узость и мрачность поперечных улиц. Ошеломил грохот движущихся по эстакадам электропоездов, непрерывный поток автомашин, темп жизни города. Поразила грандиозность творений человеческих рук и его разума.

После посещения Советского консульства и ознакомления нас с некоторыми законами и правилами пребывания и поведения в этой стране мы были направлены к месту нашей работы – в Нуарк, находящийся в 20 км от Нью-Йорка и связанный с ним линией метрополитена.

В Нуарк наша группа электровакуумщиков прибыла в январе 1937 года. В ее состав входило 13 человек, из которых три инженера были с Щелковского радиолампового завода (так в документах тогда назывался завод «Радиолампа». – *Р. П.*).

В октябре 1937 года закончилась моя командировка в США и американский теплоход «Джордж Вашингтон» пересек за шесть суток на сей раз спокойный Атлантический океан и доставил группу советских инженеров в Лондон.

Недельное пребывание в Лондоне мы с группой радиоинженеров с ленинградских предприятий использовали для посещения телецентра и ознакомления с достопримечательностями и историческими местами столицы Англии.

2 ноября советский теплоход «Андрей Жданов» после захода в порты Бремен и Киле доставил нас в Ленинград, в канун празднования 20-й годовщины Великой Октябрьской социалистической революции». Вполне вероятно, что и другие группы совершали аналогичные «путешествия».

Первая группа прибыла в Америку 10 марта 1936 г. Через месяц председатель правительственной комиссии Н. М. Синявский направляет отчет о работе группы советских специалистов на предприятиях фирмы «Радиокорпорейшн». Этот отчет рассылается Сталину, Молотову, Орджоникидзе, Ворошилову и Ежову. В нем сообщается, что группа в составе 55 человек распределяется по 5 специальностям, из которых по радиолампам работают 12 инженеров и 4 мастера. Группы сосредоточены в гор. Гариссоне (60 км от Нью-Йорка) в двух точках, где организованы 2 бригады: одна – по приёмным лампам в составе 11 человек, руководитель Симаков, а другая – по передающим лампам в составе 5 человек, руководитель Романюк.

Перед ними поставлены задачи:

а) изучить в первую очередь все типы металлических приёмных и усилительных ламп;

б) отдельные типы стеклянных ламп.

Здесь же Синявский сообщает, что американцы решительно перестраивают всё своё производство на металлические приёмные лампы взамен стеклянных.

«В настоящее время фирма наметила следующие мероприятия: 1. Они решительно взяли курс на замену стеклянных ламп металлическими. В основном уже и теперь, с 1937 г. в особенности, большинство радиоприёмников (82 %) будут изготовляться на металлических лампах. Производство стеклянных ламп пока остаётся, так как в стране имеется свыше 20 миллионов

2(533).indd 97 23.06.2017 10:20:12

приёмников на стеклянных лампах. Всё же на заводах мобилизованы все лучшие силы для того, чтобы в кратчайший срок преодолеть все те производственные трудности, которые имеют место в серийном производстве новых металлических ламп. Эту задачу американцы выполняют неплохо. Если в сентябре прошлого года брак металлических ламп у них достигал около 40 %, то в декабре 1935 года, по их данным, этот брак снижен до 29,1 %, в феврале 1936 года только 15,3 % (по стеклянным старым лампам брак 7 %); при этом надо учесть, что, наряду с постановкой на массовое производство металлической лампы, её конструктивно улучшают и изменяют».

Пока члены этой группы изучали производственные процессы на предприятиях фирмы RCA, 23 мая у секретаря ЦК ВКП(б) Н. И. Ежова состоялось совещание, на котором присутствовала вторая группа, намеченная к отправке в Америку. Совещание открыл начальник Главэспрома Л. А. Лютов. В своем выступлении он сказал: «…Для состояния нашей промышленности основным и решающим вопросом будет являться вопрос подъёма всех электровакуумных изделий. Это наше наиболее слабое место, в чём мы больше всего отстали, а также то место, которое, по существу говоря, будет определять наше дальнейшее развитие. Потому что совершенно ясно, что, не решив этой проблемы, все остальные вопросы разрешить будет трудно. Сюда входят такие вопросы, как радиоприёмники, все виды и типы станций специального применения и, наконец, такие объекты, как телевидение, – всё это мы успешно разрешим только в том случае, если разрешим в основном ламповую проблему. Поэтому, естественно, как и в первой партии товарищей, которых мы направили за границу, мы делаем известный уклон в сторону электровакуумного оборудования. …Мы должны взять буквально всё, что фирма даёт по договору в вопросах патентного порядка, но в дальнейшем мы должны отойти от этого. …Нам полагаются по договору чертежи на все виды изделий, которые имеет «Радиокорпорейшн». У них, например, существует 45 типов радиоприёмников, 80 типов радиоламп. Нам всего не нужно, мы ограничили себя небольшим количеством основных типов».

Далее выступил Н. И. Ежов. Он подчеркнул, что данная поездка «не экскурсия, а очень большое дело. Поэтому основная задача – это задача учёбы». Говоря о нормах поведения, он отметил, что, прежде всего, будучи за границей, «…вы должны сохранять своё достоинство советского гражданина, в первую очередь, и советского инженера, во вторую очередь. Авторитет советского инженера за границей – достаточно большой авторитет. Да и потом, куда им, к чёрту, с вами сравняться! То, что сделали наши инженеры, ни один заграничный работник и не нюхал, за исключением одиночек, очень крупных людей. Поэтому не ползайте на брюхе перед иностранцами, а держитесь с достоинством советского гражданина-инженера. А то ведь иные иностранцы не прочь на нас посмотреть, как на негров, на азиатов».

Следует отметить, что приезд советских хозяйственных делегаций сначала приветствовался американскими властями, но затем они стали проявлять определенную сдержанность. Так, в 1934 г. полпредству легко удавалось получить разрешение правительственных ведомств США для посещения нашими специалистами заводов, научно-исследовательских лабораторий и институтов. Однако в последующие годы (1935 и 1936) это стало делать гораздо труднее. Американцы неохотно соглашались предоставлять советским инженерам возможность знакомиться с заводами. В порядке взаимности они требовали посещения советских заводов, а им в большинстве случаев отказывали, что, как и следовало ожидать, негативно сказывалось на экономических связях между двумя странами. У американцев возникали сомнения и нежелание обмениваться делегациями. Но больше страдала советская сторона, если учесть, что уровень американской техники был, безусловно, гораздо выше, чем в СССР.

2(533).indd 98 23.06.2017 10:20:12

Первая группа за время своего пребывания на предприятиях RCA составила 280 технических отчетов, в том числе по радиолампам – 195, радиоприемникам – 44, радиопередатчикам – 6, телевидению – 9, по грампластинкам – 6, проектированию заводов – 3. К отчетам была приложена одна тысяча фотографий и эскизов. Кроме того, самой фирмой в Главэспром было выслано 174 технических отчета, 118 руководств и 12 500 рабочих чертежей.

По возвращении группы на родину их принял нарком тяжелой промышленности Г. К. Орджоникидзе, долго беседовал, подробно расспрашивая об увиденном на заводах в США. Его очень интересовала организация производства, возможность использования американского опыта в промышленности страны.

Во вторую группу были включены представители 17 предприятий и ведомств. Из предложенных ими 175 кандидатур было отобрано 44. Наибольшее число представителей было от завода «Светлана» – 8, от завода «Радиолампа» и радиозавода им. Орджоникидзе – по 6, от остальных организаций – по 1…2 человека.

От завода «Радиолампа» в составе группы были начальник цеха Сергеев М. Х., зам. начальника цеха генераторных ламп Васильев В. А., старший технолог цеха фотоэлементов Федоров М. М., зам. главного инженера Алмезов П. Л., начальник лаборатории Царев Б. М., начальник лаборатории Владимиров В. Д., слесарь-механик Волков А. К. Вторая группа отправилась в Америку в июне 1936 г. Ей предстояло работать на заводах фирмы «Радиокорпорейшн» главным образом по изучению технологии и организации производства.

14 августа нарком тяжёлой промышленности Г. К. Оджоникидзе направляет И. В. Сталину служебную записку о разработке плана освоения новой американской радиоаппаратуры, в которой сообщает: «Во исполнение указаний, данных Политбюро, Наркомтяжпромом разработан план освоения продукции на основе данных американской техники. План основан на принципе быстрейшего внедрения новой техники как по линии оборонной, так и по производству продукции общегражданского значения. При разработке плана Наркомтяжпром исходил из положения, что промышленность должна осваивать последние типы цельнометаллических ламп, минуя промежуточную стадию производства стеклянных ламп. С момента освоения в производстве этих типов ламп как в отношении оборонных объектов, так и объектов по радиоприёмной аппаратуре наша промышленность будет производить продукцию, равноценную в техническом отношении продукции передовых промышленных стран.

Намеченные планом сроки производственного освоения исходят из условия получения из США оборудования для 1-й очереди металлических ламп 7-ми типов, так как оборудование является специальным, изготовление которого в Союзе потребовало бы значительных сроков. На основе полученного из Америки оборудования дальнейшее расширение производства ламп пойдет на оборудовании, которое будет изготовляться в СССР по этим образцам. Одновременно НКТП просит об отпуске средств для заказа за границей для первых партий ламп и радиоприёмников полуфабрикатов и материалов, так как в производстве американских ламп и приёмников применяется ряд материалов и полуфабрикатов, или совершенно не изготовляющихся в СССР, или же изготовляющихся, но по более низким техническим условиям. Получение этих материалов и полуфабрикатов позволит быстро освоить американский принцип сборки и сразу же выпускать аппаратуру, не уступающую по качеству американской, а также одновременно развернуть в Союзе производство всех материалов и полуфабрикатов, не изготовляющихся ещё у нас, с тем чтобы во 2-ом полугодии 1937 г. все эти материалы и полуфабрикаты были освоены в производство. Разработанный план предусматривает выпуск в 1937 г. 3 млн американских

2(533).indd 99 23.06.2017 10:20:12

радиоприёмных ламп, 7 млн стеклянных ламп прежних типов, 240 тыс. американских радиоприёмников, с тем чтобы в 1938 г. целиком перейти на американские типы радиоаппаратуры».

Спустя три дня, 17 августа, Серго Орджоникидзе и его заместитель М. И. Каганович направляют И. В. Сталину, который, как обычно, в августе – сентябре с семьей проводил свой отпуск на Черноморском побережье в Сочи или в Гаграх, шифровку:

«Из Москвы 17/VIII – 36 г. в 17 час. 46 мин.
Вх. № 1.
Сочи. Тов. Сталину.

Для быстрейшего освоения металлических радиоламп, радиоприемников, телевизионных приемников и другой аппаратуры по договору техпомощи «Радиокорпорейшн» необходимо закупить оборудование и материалы в Америке на 2 млн 900 тыс. долларов.

Заявка на оборудование и материалы тщательно просмотрена Орджоникидзе. Просим вашего согласия.

Каганович, Орджоникидзе»

Сталин ответил в тот же день шифром из Сочи в 23 час. 45 мин.: «Насколько помнится, этот вопрос уже предрешен».

Инженеров, работавших на предприятиях фирмы, прежде всего поразила дисциплина на заводах, хорошо поставленная связь лабораторий с конструкторскими бюро, высокая технология производства. На разработку нового образца радиоприемника фирма затрачивала не более 2…3 месяцев, в то время как на советских заводах на это уходило до полутора лет.

Будучи в США, Н. М. Синявский глубоко осознал степень отсталости нашей страны в области радиотехники, о чем он констатировал 29 октября 1936 г., спустя три месяца после возвращения первой группы, в своем докладе о ходе реализации договора с фирмой «Радиокорпорейшн». В нем он сообщал, что у фирмы было закуплено 17 образцов радиоприемников, а освоить наша промышленность может не более 5. По ламповой технике выполнение договора, как и по радиоприемникам, явно неудовлетворительное. Закупленное в США ламповое оборудование находится без движения, собственное производство ламповых машин и автоматов не налажено, что ставит радиотехнику в СССР в полную техническую и материальную зависимость от американской. Полученные технические отчеты и чертежи из Америки не изучены, а специалисты заводов в ряде случаев их не видели, в то время как на приобретение оборудования и технической документации расходовались миллионы долларов. Обеспокоенный замнаркома связи предлагал принять срочные меры для устранения недостатков и проведения более решительной технической политики в области радиопромышленности. В заключение подчеркивалось: «Главное зависит от того, какими темпами мы будем американскую технику осваивать на наших заводах. Если мы от американцев будем систематически отставать на год и выше – данный договор не даст существенной пользы».

Озабоченность Синявского подтверждалась тревожными письмами, поступавшими с ленинградского завода «Светлана». В них сообщалось, что «дело с реализацией договора канцелярским порядком переводится на рельсы похоронных мероприятий и что результатов от договора по технической помощи нет, ибо на заводе преобладает самотек, лихорадка и спешка. Волокита и медлительность сорвут все». Прочитав доклад, нарком К. Е. Ворошилов сделал надпись: «Выяснить, кому еще направили этот материал».

Обеспокоенный создавшимся положением, Совет Труда и Обороны СССР 23 ноября 1936 г.

2(533).indd 100 23.06.2017 10:20:12

в Проекте постановления «О плане внедрения достижений американской радиотехники в советскую промышленность» с целью эффективного использования заключённого договора с фирмой «Радиокорпорейшн» и внедрения достижений американской радиотехники в нашу промышленность и аппаратуру для военной радиосвязи и телемеханики постановил: «В 1937 г. освоить в серийном производстве в первую очередь 8 типов американских металлических приёмно-усилительных ламп и 4 типа стеклянных для питания от сетей переменного тока, накал 6,3 вольта, и 2 типа американских ламп типа «Желудь»; освоить в серийном производстве 6 типов американских генераторных ламп и в 1938 г. дополнительно 6 типов по согласованию с НКО; представить к 1 марта 1937 г. план освоения в серийном производстве 5 типов американских металлических радиоприёмных ламп постоянного тока, ламп низковольтных и ламп для телевизионной аппаратуры.

Для создания соответствующих производственных мощностей, позволяющих эффективно использовать договор с «Радиокорпорейшн», и применения американских методов производства обязать Наркомат тяжёлой промышленности: в 1937 г. построить на заводе «Радиолампа» цех металлических ламп на ежегодный выпуск 25000 тыс. ламп и приступить к форсированию строительства 2-й очереди завода «Радиолампа» с вводом в эксплуатацию на полную мощность в 1939 г. В 1937 г. установить на этом заводе 2 опытных комплекта оборудования для производства металлических ламп, на этом же заводе организовать производство металлических радиоламп 2-вольтовой серии и генераторных ламп по американским образцам. Приступить к строительству в 1938 г. научно-исследовательского института по вакуумной технике». В Постановлении Совета Труда и Обороны от 14 марта 1937 г. сказано, что строительство завода № 191 должно быть закончено полностью. Завод должен стать основной ламповой базой для всех военных радиостанций. Кроме того, на нем должны быть созданы базы по ламповому машиностроению и по производству специальных видов проволоки, имеющих применение в ламповом производстве».

В июле техническая контора Технопромимпорта провела проверку выполнения договора на заводах № 210, 211, 209 с целью выяснения использования этими предприятиями технической помощи и установления на месте качества завозимого оборудования. В результате проверки было установлено, что «завод № 210 до сегодняшнего дня не имеет технологического процесса, установленного на фирме RCA, как на обработку деталей и их сборку, так и на разработку инструмента и приспособлений».

«…Завод № 211, изготовляющий металлические радиолампы, имеет завезенного полуфабриката в количестве, обеспечивающем выпуск ламп по заданной программе на 6…8 месяцев, причем по основным полуфабрикатам и сырью завод имеет советских поставщиков. Однако советский материал заводом в масштабе заводского производства не применяется, что явно является ненормальным и ставит также под угрозу производство, в случае несоответствия полуфабрикатов и сырья, поставляемых советскими предприятиями, и потребует немедленного импорта.

Необходимо особо отметить, что выезды комиссий к фирме RCA были некомпетентны, поэтому на заводе № 211 лежит оборудование для производства стеклянных ламп, производством которых завод не занимается. Было завезено на 24 тыс. руб. запасных деталей и частей, производство которых по сложности, точности, материалу не представляло для нас трудности (шестеренки, вилки, валики, кюветки, тальк, парафин). За все время действия договора от фирмы RCA на завод были вызваны 6 специалистов, причем не к моменту освоения технологического

2(533).indd 101 23.06.2017 10:20:13

процесса, а в момент хода монтажа, в результате чего использовать их оказалось невозможно, и по прошествии 6 месяцев данные специалисты были отправлены обратно».

«…Все вышеизложенное, а также прилагаемые к сему отчеты требуют передачи в следственные органы для установления виновных в срыве использования договора, в завозе заведомо ненужного оборудования, в завозе материала, производимого в СССР, в создании разрыва между предприятиями (завод № 211 завален металлическими радиолампами, идущими для приемников завода № 209, в то время как завод № 209 по строительству и монтажу запаздывает на год с лишним)».

В начале мая 1938 г. Совнарком СССР создает комиссию по проверке состояния и реализации договора с фирмой «Радиокорпорэйшн» и подготовке конкретных предложений по дальнейшему использованию этого договора. В частности, комиссии предстояло выяснить:

«а) правильность использования в Союзе всех инженеров, прошедших практику у фирмы «Радиокорпорэйшн»;

б) правильность использования всех чертежей, полученных по этому договору;

в) какую аппаратуру и изделия должна была дать и не дала фирма «Радиокорпорэйшн», а также что фирмой дано и нами не реализовано;

г) разработать предложения об организации производства всей аппаратуры и деталей, до сего времени не освоенных и не поставленных на производство на заводах НКОПа».

Прервем наш рассказ, чтобы с помощью сотрудников завода «Радиолампа» прокомментировать пункт «а» – «правильность использования в Союзе всех инженеров, прошедших практику у фирмы «Радиокорпорэйшн». Этому вопросу посвящена статья начальника лаборатории завода «Радиолампа» Б. М. Царева, командированного на заводы фирмы RCA в составе второй группы. Статья под названием «Уничтожить неразбериху в деле внедрения американской техники» была опубликована в заводской газете «Стахановец» [1].

«Освоение американской техники на нашем заводе до сих пор не получило такого размаха, который обеспечил бы выполнение всех поставленных перед нами задач. Конечно, многое зависит от дирекции завода и созданного ею инбюро (Иностранное бюро по освоению американской техники. – *Р. П.*). До сих пор существует организационная неразбериха, это приводит часто к выполнению функций одного отдела другими и недопустимо тормозит многие работы по освоению американской техники. Но и существующие возможности далеко не используются полностью. Начну с кадров. Во-первых, из побывавших в Америке товарищей (а их на заводе насчитывается 14 человек) четверо заняты организационно-административными делами крупного масштаба (тт. Романюк, Гальдин, Черноусов, Ольмезов). Другие – Федоров, Васильев, Волков, Сергеев – заняты организационной суетой по подготовке производства американских ламп, т. е. вроде с пользой для освоения американской техники. Махновский, Шишкин, Сорокин, Адель почти совсем не причастны к американской технике, и только двое, Владимиров и Царев, непосредственно заняты американскими лампами. Так обстоит у нас на заводе дело с использованием специалистов, изучавших американскую технику в Америке.

Не лучше обстоит дело с изучением американской техники. Так, побывавшие в Америке считают, что они изучили все и здесь им по изучению американской техники делать нечего. Плана по американскому техминимуму на заводе нет. Есть лишь набор случайных тем. Лекции систематически срываются. Этому необходимо положить конец. Инбюро, т. Сергееву, и отд. подготовки кадров, т. Абрамову, пора уже создать ряд систематических курсов по изучению американской техники для работников различных категорий. Для этого мы обладаем богатей-

2(533).indd 102 23.06.2017 10:20:13

шим материалом как в виде фирменных «Стандартайзинг-нотисов», так и в виде отчетов наших товарищей, ездивших за границу.

С подготовкой к освоению американских ламп также не благополучно. Людей, занятых этим делом, недостаточно. Распыление этой работы по разным отделам создает тормоз. Создание всего технического документажа систематически срывается. Из-за отсутствия синьки и бумаги нет возможности быстро создать чертежи американских ламп, так как светокопия, несмотря на неоднократные постановления, до сих пор не создана.

С подготовкой документажа по металлическим лампам обстоит совсем скверно. Главный инженер Романюк, видимо, надеется получить все материалы в готовом виде с завода «Светлана», но опыт уже показал, что получаемый оттуда материал имеет много дефектов: переводы устаревших карт, ошибки в них, путаница в комплектовании и т. д. У нас, вместо того чтобы сосредоточить в одних руках всю работу по подготовке документажа по металлическим лампам, ее распылили по различным отделам. Лаборатория при существующих штатах не в состоянии охватить нормально весь объем работы, а работа в цехе № 2 ведется стихийно и без всякой увязки с другими отделами. Больше того, до сих пор ни инбюро, ни дирекция не могут выяснить, какой вариант конструкции будет нами осваиваться, а это тормозит создание документажа.

Совсем плохо обстоит дело и с внедрением американской техники. Систематического плана внедрения в производство американской техники на заводе нет, а ведь многие участки требуют коренной реконструкции. Не пора ли тт. Романюку и Гальдину и руководителям отделов тт. Сорокину, Сергееву, Абрамову перейти от самотека к плановому внедрению американской техники на нашем заводе. Главное – уничтожить существующую неразбериху, увязать работу различных отделов как по отдельным участкам, так и по времени, так как существующая до сих пор путаница и неразбериха могут привести к срыву всего задания по освоению американских ламп.

От редакции: тов. Царев в своей статье поднимает очень важные вопросы. Редакция просит Романюка, Гальдина, Черноусова, Олмезова, Федорова, Васильева, Волкова, Сергеева, Махновского, Шишкина, Сорокина, Адель и Владимирова выступить на страницах нашей газеты по затронутым вопросам».

Из этой статьи следует, что из 14 сотрудников завода, направленных на предприятия фирмы RCA для изучения американского опыта по производству металлических радиоламп, только двое, Владимиров и Царев, непосредственно занимаются освоением его на заводе. Остальные 12 человек были просто «экскурсантами».

Очевидно, подобное положение было и на других предприятиях, сотрудники которых изучали американский опыт. Об этом свидетельствует Отчет сотрудников Наркомвнешторга СССР наркому оборонной промышленности М. М. Кагановичу от 28 июня 1938 г. о ходе выполнения договоров о технической помощи между СССР и США:

«Командированные приезжают в Америку без конкретных заданий и указания, на какой работе они будут использованы при возвращении на завод. Имеющиеся технические задания в большинстве случаев носят формальный характер (так как без задания посылать людей за границу нельзя), составляются самими командированными и не отражают узких мест работы заводов при внедрении американской технологии и организации производства. Все командируемые в Америку должны получать исчерпывающие задания с учетом их квалификации и характера работы, на которую командированный будет поставлен после своего возвращения на завод».

Вот другой пример по изучению опыта. О нем пишет заместитель главного инженера завода В. Н. Черноусов в газетах «Стахановец» № 1 и 5 за 1937 г. В них он делится своими впечатле-

2(533).indd 103 23.06.2017 10:20:13

ниями от посещения заводов фирмы. В № 1 он пишет: «Есть ли чему учиться на американском заводе, производящем лампы? Да, есть чему. Многое мы должны перенести из американского опыта работ к себе на завод. И в первую очередь это организацию производства технологического процесса и производственную культуру. Затем мы должны завести ту же систему учета работ, как это существует на американских заводах. Хочется в серии отдельных заметок в нашей газете «Стахановец» рассказать всем работающим на нашем заводе о хороших методах работы американского завода Р.С.А. (Радио-Корпорация Америки).

Вся группа, которая ездила в Америку, приложит все силы и отдаст все полученные знания для быстрейшего внедрения американской техники на наш завод. Но мы нуждаемся в помощи всего коллектива, работающего на заводе. Если помощь будет энергичная, то наш завод сумеет в очень короткое время освоить американские методы работ. Для этого каждому из нас надо больше работать над собой.

В этой заметке расскажу, какое впечатление было и осталось от американского завода Р.С.А.

Первое, что бросается в глаза при общем знакомстве с заводом, это чистота. Чистота дворов, чистота цехов и рабочих мест. Нет ни одной лишней вещи во дворе. Все имеет свое место. Если требуется что-либо вынести во двор, то выносится в определенное место, откуда быстро вывозится с территории завода. Каждый рабочий соблюдает этот порядок. Никогда вы не увидите, чтобы, выйдя на заводской двор, рабочий взял да и бросил что-либо. Нет. Он не поленится дойти до указанного места и положить аккуратно выносимую вещь, какой бы она грязной не была. Это во дворе. В цеху такой же порядок. Между операциями не увидишь скопления деталей и, тем более, лишних вещей. Ни в коем случае. Нет абсолютно тары с лампами. На всем заводе их не увидишь. В чем же секрет?

Об этом я расскажу в следующем номере».

Следующий № 5 был посвящен «Опрятности и чистоте»

«Это особенно сильно бросается в глаза, когда видишь американских рабочих и работниц, они очень аккуратны. Значит ли это, что американские рабочие богаты и у них только все новое на себя надето? Далеко нет. Очень большая ошибка так думать, ибо труд рабочих в Америке оплачивается капиталистами очень дешево. Мне неоднократно приходилось видеть на производстве молодых работниц, у которых на кофточке или платье имеется несколько заплаток, но все это сделано очень аккуратно, их платья чистеньки и наглажены. Этой аккуратности может добиться каждая работница нашего завода. Расскажу вам из моих наблюдений, как эта аккуратность и опрятность достигаются. Жили мы вдвоем в комнате рабочего: отец этой семьи работал ночным рабочим на фабрике линолеума, сын – пекарь, работал продавцом, две дочери – работницы завода, работали по 9…10 часов, затем приходили домой, занимались по хозяйству и с ребенком, и все же, несмотря на такую загрузку, находили время через день стирать свои кофточки и платья. Вечером выстирают платье, а утром его гладят, вставая для этого на полчаса раньше. У мужчин первое, что увидишь, – это бритые лица. Мужчины бреются ежедневно, для этого не требуется большой траты времени. На них костюмы отглажены.

Мне могут кинуть упрек, что я говорю это, не учитывая условий жизни рабочих и работниц нашего завода. Но товарищи, при любых условиях, пусть даже самых трудных, можно быть аккуратным. Аккуратность и чистота нужны и для освоения американской техники. Выработав аккуратность к самому себе, будешь всегда аккуратен и в работе, научишься хорошо и чисто работать. Будет очень хорошо, если в этом деле возьмет почин молодежь нашего завода. Мне кажется, что было бы хорошо в отдельных договорах о соцсоревновании включить пункт

2(533).indd 104 23.06.2017 10:20:13

о чистоте и аккуратности к самим себе». Разумеется, пропагандировать чистоту и аккуратность на производстве необходимо, но для этого не обязательно ехать в Америку. Но в то же время эта поездка способствовала началу внедрения на заводе так называемой «вакуумной гигиены», одной из основных задач, стоящих при производстве электровакуумных приборов.

Продолжим наш рассказ. Мы остановились на том, что в начале мая 1938 г. Совнарком СССР создает комиссию по проверке состояния и реализации договора с фирмой «Радиокорпорэйшн» и подготовке конкретных предложений по дальнейшему использованию этого договора. В свою очередь, Наркомвнешторг в июне, когда со времени подписания договора прошло почти 3 года, на основании нескольких докладных записок делает своё заключение, в котором говорится, что «из всего сказанного вытекает, что рассматриваемый нами договор не является договором технической помощи в том смысле, как это обычно понимается в нашей советской практике. Как известно, договор о технической помощи обычно имеет своим предметом обязанность иностранной фирмы не только ознакомить советских хозяйственников с теми или иными производственными процессами, которые ведутся заграницей, но и содействовать организации тех или иных процессов в СССР путем технических консультаций, монтажа оборудования на месте, наблюдения за отдельными стадиями производства в СССР и т. д.».

В этом заключении указываются недостатки договора. Например, то, что под технической помощью договор разумеет информацию, а не консультацию, таким образом, он не налагает на «Радиокорпорэйшн» обязанности консультировать производственные процессы в СССР. Существенными нарушениями договора считается недопущение наших инженеров в опытные цеха, лаборатории и к некоторым объектам, при наличии допуска туда граждан третьих стран (японцев). Передача заведомо устарелого материала и уверения, что материал не устарел, и т. д. «Если имелось в виду получение технической помощи в том смысле, как это обычно понимается, то договор этой цели не достигает, и это является главным недостатком договора. Если же брать договор так, как он есть (обязанность предоставления информации о технических процессах в США), то он при всех условиях предполагает большую добросовестность со стороны «Радиокорпорэйшн». Мы можем знать о новейших технических процессах лишь из информации фирмы. Последняя же, ввиду крайне туманной формулировки условия о секретности, всегда будет иметь возможность обставить дело так, чтобы не дать нам той или иной интересующей нас информации». Напомним, что это заключение было сделано спустя 3 года после начала действия договора.

В Америке наши инженеры жили группами 2…4 человека на частных квартирах в Кемдене и Гариссоне. За квартиру платили 10…15 долл. в месяц. Для них было организовано систематическое обучение английскому языку по группам. Учились 3 раза в неделю (2 часа урок). Переводчики обслуживали наших инженеров только на заводе. После работы их не использовали. Сделано это было умышленно для того, чтобы особого сближения инженеров с этой ненадежной публикой не было. После работы инженерам приходилось обрабатывать отчёты и, кроме того, изучать язык.

Вот один любопытный документ от 19 октября 1938 г., относящийся к этому периоду. Он взят из отчета члена комиссии Главэспрома М. Петелина о работе группы советских инженеров в США. «В настоящий момент общее число командированных в Америку составляет 29 человек. Они находятся на заводах в Кемдене – 17 человек, в Гаррисоне – 10 и Роки-Пойт – 2. В Гаррисоне, где расположены электровакуумные заводы фирмы RCA, организуются встречи американцев с советскими инженерами. Практикой пребывания наших инженеров установилось, что большее

2(533).indd 105 23.06.2017 10:20:13

время наши инженеры находятся в офисе, а изучение техники базируется в основном на методе бесед, причем инициатива, активность в беседах принадлежит нашим инженерам, поскольку они задают вопросы. Американские инженеры видят наших людей только как гостей, совсем не связанных с повседневной производственной работой цеха, лаборатории. Они находятся в таком положении, что ни в какой степени не отвечают за передачу технического опыта, а фирму это устраивает во всех отношениях.

Поэтому, чтобы ликвидировать эту ненормальность, я потребовал от фирмы выделения рабочих мест в цехах, в лабораториях для постоянного нахождения наших инженеров, с тем чтобы американцы не видели в нас гостей, совершающих каждый раз экскурсию, а видели таких же работников, осваивающих американскую технику в процессе работы.

К каждому нашему инженеру, мастеру должен быть прикреплен по нашему выбору специалист-американец, который отвечал бы перед фирмой за качество технической помощи. Этот американец должен также проявлять инициативу, активность в технической помощи и за такой короткий промежуток времени не только показать свои текущие работы, но и ввести также в технику, в курс дела в своей области за пределами своей лаборатории, цеха.

Качество бесед показывало, что американцы материально не заинтересованы в этих беседах, т. к. отдельно работа с нашими инженерами не оплачивается. Мною заявлено фирме, что за наши деньги они должны не формально, а по существу заинтересовать людей в передаче нам технического опыта. Фирма на мои официальные письма о требовании рабочих мест для наших людей, прежде чем ответить, устроила свое совещание для обсуждения этого вопроса. Они мотивировали некоторую задержку тем, что они должны этот вопрос согласовать с постоянным агентом правительства, находящимся на производстве. Фирма была обеспокоена тем, что она не сможет контролировать место постоянного нахождения наших инженеров.

По всем вопросам, затронутым выше, было организовано совещание, на которое из Гаррисона был вызван м-р Ванкерн, который попросил меня разъяснить мои требования. Что я и сделал. В результате было заявлено, что все требования будут удовлетворены, т. е. для каждого нашего инженера будет выделено рабочее место, прикреплен инженер; будут созданы условия для непосредственного участия в производственной работе.

На другой же день, т. е. 23 сентября 1938 г., мы начали переселение наших людей в цеха, в лаборатории. Эту работу проделали в течение четырех дней. Теперь все люди, как в Кемдене, так и в Гариссоне, имеют постоянные рабочие места и прикрепленных американских специалистов.

Для того чтобы рядовые инженеры американцы поняли, что мы от них хотим, мы организовали обед на 76 человек, где каждый советский инженер пригласил инженеров, мастеров, механиков, кто с кем работает. В начале обеда мною была сказана речь на русском языке, которая затем была прочитана на английском языке. Привожу выдержку для Вашего сведения:

«Мы знакомимся и изучаем американскую технику слабых токов потому, что считаем, что американская техника наиболее прогрессивная. Фирма RCA – наиболее передовая фирма Америки, которая имеет хорошие кадры инженеров. Но как идет освоение американской техники, как оказывается техническая помощь в этом вопросе? Наши инженеры, мастера, механики и т. д., приезжая в Америку, конечно, себя чувствуют не как дома – и страна новая и язык не родной – трудностей очень много. Мы обладаем штатом хороших переводчиков, но этого недостаточно. Чего же не хватает? Не хватает многого, но главное – инициативы, активной помощи с Вашей стороны. Американский инженер обычно привык к системе бесед, в которых

2(533).indd 106 23.06.2017 10:20:13

он должен отвечать на вопросы, задаваемые русскими инженерами – и только. Вы прекрасно знаете, что этого недостаточно. Наиболее эффективна наша работа будет тогда, когда активность будет с обеих сторон.

Мне бы хотелось, чтобы наши инженеры не знакомились, а изучали технику, организацию Вашей работы, принимая непосредственное участие во всех стадиях работы в лабораториях. Американский инженер, зная, что русский инженер приехал на короткое время, должен познакомить, рассказать об американских новинках из своей и родственных областей. Рассказать о перспективах, ввести в русло своей техники.

Я по всем вопросам технической помощи беседовал с вашими руководителями, присутствующими здесь на нашей встрече, в результате теперь почти каждый инженер, мастер имеет рабочее место, где он сможет непосредственно осваивать технику, к каждому русскому прикреплен американец, который передает свой опыт, помогает осваивать и изучать американскую технику. Формальные стороны уже выполнены, теперь остается живым людям совместно работать. Я обращаюсь ко всем Вам с пожеланием понять друг друга, несмотря на разные языки, и установить тот деловой контакт и общий язык, который даст максимальную пользу в работе».

Нужно сказать, что в результате этой встречи в цехах, в лабораториях картина резко изменилась. Американцы теперь стали со своей стороны помогать, сообщая новинки, проявляя инициативу».

После ознакомления с этим документом возникает вопрос: если первая группа прибыла в Америку 10 марта 1936 г. а до октября 1938 г. здесь побывало еще несколько групп, то почему основной вопрос взаимодействия наших специалистов с руководством предприятий фирмы решался два с половиной года? Ведь, не решив проблемы, описанные выше, нельзя получить необходимую информацию и квалификацию для производства электровакуумных приборов. Выходит, не было какого-то общего положения по этому вопросу, и каждая группа сама налаживала взаимоотношения с сотрудниками фирмы.

Действие договора с фирмой RCA заканчивалось 31 декабря 1940 г., и за полтора года до этого события, 10 марта 1939 г., секретарям ЦК ВКП(б) А. А. Андрееву и Г. М. Маленкову поступает докладная записка, в которой сообщается, что «…договор имеет крупнейшие дефекты. Например, аппаратура, производимая RCA, только на 30 % собирается из деталей её собственного производства – остальные 70 % деталей она получает от «подконтрольных организаций» и «третьих лиц» и не берёт на себя никаких обязательств в отношении информации по этим деталям. RCA не производит и не берёт на себя никаких обязательств в отношении информации по производству ряда важнейших деталей и аппаратов, которые особенно интересуют Советский Союз: мощные генераторные и выпрямительные радиолампы».

Кроме этого, фирма недобросовестно выполняет и другие пункты договора. «Например, она продала Советскому Союзу образцы металлических радиоламп и заводское оборудование для их производства в тот момент, когда сама сокращала их производство и перешла на производство стеклянных ламп. В результате этого Советский Союз с этой «новинкой» отстал от передовой радиотехники на 5-6 лет.

Другой пример недобросовестности фирмы. По договору, СССР имеет право ежегодно посылать на заводы фирмы 100 человек, специалистов, однако это право систематически не используется: в 1936 г. было послано 74 чел., в 1937 г. – 65 чел., в 1938 г. – 44 чел., а в первом квартале 1939 г. – 21 чел. Плана посылки специалистов в Америку нет».

По договору, фирма, кроме приема советских специалистов, должна была поставить СССР

2(533).indd 107 23.06.2017 10:20:13

необходимое для производства радиотехники оборудование и материалы. Это решение пришло, когда правительство поняло, что самим разработать качественные отечественные радиолампы и самим создать технологию их производства невозможно, оно просто купило у американской фирмы новейшее заводское оборудование и приобрело право на использование технологии изготовления радиоламп. Для этого Постановлением Политбюро ЦК ВКП(б) от 19 августа 1936 г. было разрешено «НКТП закупить в Америке по договору с «Радиокорпорейшн» оборудование и материалы на 2900 тыс. долл.».

13 марта 1937 г. Политбюро утверждает решение Комитета Обороны о покупке дополнительного оборудования для завода № 191 («Радиолампа»). В нем говорится: «Для доведения оборудования завода № 191 до необходимой комплектности разрешить НКОП заказать в 1 квартале с. г. недостающее оборудование в Америке, согласно Приложению, на сумму 300 000 долл.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Список импортного оборудования для завода № 191

Сборочное оборудование для генераторных ламп	5 000 долл.
Заготовительное оборудование для генераторных ламп	90 000 долл.
Установки для изготовления деталей металлических ламп (аноды, сетки катоды, изоляторы и т. д.)	73 000 долл.
Печи отжига деталей в газах	20 000 долл.
Установка для изготовления карбонатов, биндеров и т. п.	15 000 долл.
Установка для питания сварочных станков	16 000 долл.
Установка для обработки деталей (карбонизация, чернение, окраска, пульверизация слюды и т. п.)	25 000 долл.
Дополнительное оборудование (многопуансонные прессы, автоматы для сеток и т. п.)	26 000 долл.
	Итого: 300 000 долл.»

Это была только часть закупленного у фирмы оборудования, стоимость же полного оснащения им завода «Радиолампа», с покупкой лицензии на радиолампы, была около 8 млн долл.

Производство металлических ламп октальной серии фирмы RCA на заводе «Радиолампа» должно было осуществляться первоначально на семи комплексных поточных линейках с соответствующим заготовительным оборудованием. По плану, их общая производительность должна была составлять 28 тыс. радиоламп в одну смену, а к началу 1941 года на заводе с пуском всех 12 линеек производительность в одну смену должна была составить порядка 50 тыс. штук.

Подводя итоги действия договора о технической помощи между Главэспромом и RCA, следует сказать, что в процессе модернизации отечественной промышленности эта помощь играла роль импульсов, задававших направление и ритм ее движению. Импульсы эти, как правило, были весьма своевременны и нацелены на решение самых насущных и приоритетных задач развития отечественной промышленности средств связи. Один из основателей отечественной электроники С. А. Зусмановский отмечал, что эта помощь позволила превратить нашу промышленность из кустарной в современную и механизированную. В то же время ни в коем случае нельзя отрицать огромного вклада отечественных ученых, конструкторов, инженеров, организаторов производства, многотысячных коллективов рабочих и служащих промышленных предприятий и научно-исследовательских учреждений в достижение научной и технологической самостоятельности электрослаботочной отрасли в советский период. Вклад этот хорошо известен и не подлежит никакой ревизии.

2(533).indd 108 23.06.2017 10:20:13

Одна из групп в своем письме из Америки писала: «...Мы, находясь здесь, ни на минуту не забываем, что являемся членами единой семьи, и стараемся осваивать передовую американскую технику, чтобы принести пользу нашему общему делу. По приезде на Родину мы это докажем на деле».

В 1940 году завод «Радиолампа» выпускал ежемесячно около 170 тыс. радиоламп 24 типов. Однако в 1940 году три завода: «Светлана», "МЭЛЗ" и «Радиолампа» – выпустили не более 3 млн радиоламп.

Одна из первых программ советского правительства по привлечению иностранцев к восстановлению хозяйства стартовала в начале апреля 1922 г., когда политбюро выделило на реализацию мер «промышленной помощи» сумму в 10 млрд руб., сравнимую с затратами на помощь голодающим [2]. Деньги были перечислены «Межрабпому» – международной «надпартийной» организации, учрежденной для создания «тысяч каналов» революционной пропаганды [3]. Политбюро представляло дело так, что передает госсобственность не капиталистам-эксплуататорам, а пролетариям, помогающим строить социализм, но на самом деле пропагандистские цели кампании превалировали над экономическими.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Царев, Б. М**. Уничтожить неразбериху в деле внедрения американской техники / Б. М. Царев // «Стахановец». – 1937. – № 16.

2. // McMeekin. – 2003. – P. 128.

3. // Мюнценберг. – 1924. – С. 28.

Статья поступила 20 марта 2017 г.

2(533).indd 109 23.06.2017 10:20:14

УДК 621.382

ПЛОТНОСТЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТИЦ В ПОЛУПРОВОДНИКЕ В УСЛОВИЯХ УДАРНОЙ ИОНИЗАЦИИ

И. А. Балько, А. К. Балько

АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино

Получено аналитическое выражение для плотности распределения вероятности флюктуации числа электронов в лавине при ударной ионизации в полупроводнике. Показано, что это распределение связано с тождеством Абеля, многочленами и числами Белла и числом разбиений натурального числа на части. При этом отмечена связь между этим числом разбиений и треугольником Паскаля.

КС: плотность распределения вероятности, флюктуация числа электронов в лавине, ударная ионизация, полупроводник, тождество Абеля, многочлены и числа Белла, треугольник Паскаля

THE PARTICLES DISTRIBUTION DENSITY IN SEMICONDUCTOR IN SHOCK IONIZATION CONDITIONS

I. A. Balyko, A. K. Balyko

JSC «RPC «Istok» named after Shokin», Fryazino

An analytical expression is obtained for the density distribution of the fluctuations of the number of electrons in an avalanche during shock ionization in a semiconductor. It is shown that this distribution is related to the Abel identity, the Bell polynomials and numbers and the number of the partitions of the natural number into parts. At the same time the connection between this number of partitions and Pascal triangle is noted.

Keywords: probability density function, fluctuation of the number of electrons in an avalanche, shock ionization, semiconductor, Abel identity, Bell polynomials and numbers, Pascal triangle

Исполнилось 90 лет со дня рождения видного советского ученого в области электроники СВЧ, лауреата Ленинской премии, доктора технических наук, профессора Александра Семеновича Тагера.

В середине 50-х годов прошлого столетия параллельно с работами по электровакуумным приборам А. С. Тагер начал интенсивно заниматься теоретическими, технологическими и экспериментальными проблемами полупроводниковой электроники СВЧ. Эти исследования привели к созданию лавинно-пролетного диода (ЛПД), пожалуй, главного «детища» в научном творчестве ученого. ЛПД был разработан на основе открытия в 1959 г. сотрудниками НПП «Исток» Александром Семеновичем Тагером, Анатолием Ивановичем Мельниковым, Ахметом Магометовичем Цебиевым и дипломником Геннадием Петровичем Кобельковым явления генерации и усиления СВЧ-колебаний при лавинном пробое полупроводниковых диодов (диплом на открытие № 24. Приоритет от 29.10.1959). Знаменательно, что в момент открытия 32-летний А. С. Тагер имел стаж работы на предприятии 8 лет, 25-летний А. И. Мельников – полтора года, 23-летний А. М. Цебиев – три месяца, а 22-летний Г. П. Кобельков был студентом МФТИ. Среди зарегистрированных открытий в СССР другого такого молодого авторского коллектива не было. Этот факт придает особую окраску единственному «истоковскому» открытию, которое остается и единственным отечественным открытием в области полупроводниковой электроники СВЧ.

2(533).indd 110 23.06.2017 10:20:14

Позднее сотрудниками «Истока» Тагером А. С., Мельниковым А. И., Цебиевым А. М., Ходневичем А. Д., Гладуном А. Д., Перегоновым С. А., Самородовой Г. А., Скиданом А. В., Пчелиным В. А., Ольчевым Б. М., Бердавцевым В. Б., Говоровой Д. И., Черненко Е. И., Жерновенковым А. С., Фомичевой Н. Н., Мелешкевичем П. М., Зыриным С. С., Ештокиным В. Н., Котовым А. С., Блажновой Е. И., Темновым А. М., Снегиревым В. П., Лезиным А. А., Саломатиным И. А., Негиревым А. А., Федоровым А. С., Мякиньковым В. Ю., Богдановым Ю. М., Шапиро Ф. М., Саенко М. А., сотрудниками других предприятий Красиловым А. В., Вальд-Перловым В. М., Вейцем В. В., Лисогорским М. Е., Данюшевским Ю. З., Кокориным И. А., Захаровым А. А., Романюком В. А. и и многими другими, а также сотрудниками лаборатории в теоретическом отделе, созданной Тагером А. С. в 1972 году, Голантом Е. И., Погореловой Э. В., Сулимовым В. Б., Гусельниковым Н. А., Овечкиным С. М., Варгузовым С. И., Мартыновым Я. Б., Манченко Л. В., Пашковским А. Б., Кальфой А. А., Порешем С. Б., Гарматиным А. В., Юсуповой Н. И., Попадьиным А. А., Брагиной Н. А., Синицыным В. В., Бувайлик Е. В., Беляевой И. В., Козловцевой О. Н., Головко Б. А., Балыко А. К. были разработаны принципы расчета и конструирования различных устройств на основе ЛПД и родственных им полупроводниковых приборов. Эти исследования, первые из которых были выполнены до появления в 1965 г. зарубежных публикаций по ЛПД, были обобщены в 1962 г. в докторской диссертации А. С. Тагера [1] и в первой в мировой литературе монографии по ЛПД Тагера А. С. и Вальд-Перлова В. М. [2], доказали широкие возможности применения устройств на ЛПД в технике СВЧ и явились основой многочисленных конкретных отечественных и зарубежных разработок.

В настоящей статье рассматривается пионерная работа А. С. Тагера «Флюктуации тока в полупроводнике (диэлектрике) в условиях ударной ионизации и лавинного пробоя» [3]. Несмотря на то, что с момента ее публикации прошло более полувека, а в технике СВЧ ЛПД за последние два десятилетия практически повсеместно были вытеснены полевыми транзисторами, изучение физических процессов ионизации в полупроводнике продолжает оставаться актуальным.

В этой работе А. С. Тагер предложил метод расчета вероятности $P(n)$ того, что полное число частиц (электронов), образовавшихся в результате ионизации и прошедших через слой умножения, равно n:

Каждый акт ионизации, производимый одной частицей, представляет собой случайное событие, поэтому вероятность того, что частица, вошедшая в слой умножения, произведет m ионизаций, определяется формулой Пуассона:

$$p_m = u^m e^{-u}/m!, \qquad (1)$$

где u – среднее число ионизаций, совершаемых частицей в слое умножения.

Вероятность вылета из слоя умножения одного электрона P(1) равна вероятности того, что первичный электрон пройдет слой без соударений: $P(1) = p_0 = e^{-u}$.

Если первичный электрон совершит в слое одну ионизацию, после этого он и рожденный при этом электрон пройдут слой без ионизации, то вероятность вылета из слоя умножения двух электронов P(2) будет равна

$$P(2) = p_1 p_0 = u\, e^{-2u}/1!. \qquad (2)$$

Продолжая эти рассуждения, получаем для числа электронов n = 3

$$P(3) = p_1^2 p_0 + p_2 p_0^2 = u^2 e^{-3u} [1/(1!)^2 + 1/2!]. \qquad (3)$$

И, наконец, получаем

$$P(n) = C_n u^{n-1} e^{-nu}, \qquad (4)$$

где C_n *– численные коэффициенты:* $C_1 = C_2 = 1$, $C_3 = 3/2$, $C_4 = 8/3$, $C_5 = 101/24$, $C_6 = 44/5$ …

2(533).indd 111 23.06.2017 10:20:14

Поскольку в лавине участвует огромное число электронов, то цель настоящей работы – получить аналитическое (без численных коэффициентов) выражение для распределения вероятности $P(n)$.

Так как речь идет о числе электронов, то оценим возможности применения известных результатов из теории чисел.

Рассмотрим случай с $n = 4$. Четыре электрона вылетят из слоя умножения, если в слое произойдут три ионизации. Это возможно, если:

а) первичный электрон произвел три ионизации и далее этот электрон и рожденные им три электрона пройдут слой без ионизаций;

б) первичный электрон произвел две ионизации и одну ионизацию произвел рожденный им электрон;

в) первичный электрон произвел одну ионизацию, затем рожденный электрон произвел одну ионизацию, а затем и рожденный при этом электрон произвел одну ионизацию.

Если перейти от физической картины ионизаций частиц к описанию этого процесса с помощью чисел, например числа ионизаций, то получаем задачу о разбиении целого числа на одну, две, три и т. д. частей. В случае четырех электронов и трех ионизаций эти три пункта можно представить в виде равенств: 3 = 2 + 1 = 1 + 1 + 1. Этот раздел математики, как известно, называется теорией разбиений [4]. Основной характеристикой этой теории является функция разбиений $p(n)$ – количество разбиений числа n. Для числа разбиений по частям построим треугольник разбиений (табл. 1).

Таблица 1

Число частей

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	$p(n)$
1	1									1
2	1	1								2
3	1	1	1							3
4	1	2	1	1						5
5	1	2	2	1	1					7
6	1	3	3	2	1	1				11
7	1	3	4	3	2	1	1			15
8	1	4	5	5	3	2	1	1		22
9	1	4	7	6	5	3	2	1	1	30

Из табл. 1 следует, что, например, для $n = 7$ число разбиений $p(n) = 15$:

7 = 6+1 = 5+1+1 = 4+1+1+1 = 3+1+1+1+1 = 2+1+1+1+1+1 = 1+1+1+1+1+1+1
5+2 4+2+1 3+2+1+1 2+2+1+1+1
4+3 3+3+1 2+2+2+1
3+2+2
1 2 4 3 2 1 1

Здесь и далее жирным шрифтом выделено число соответствующих комбинаций при разбиении.

Несмотря на всю привлекательность теории разбиений, непосредственно к решению нашей задачи она не применима, поскольку в ней комбинации с переменой мест чисел (например,

2(533).indd 112 23.06.2017 10:20:14

2 + 1 и 1 + 2) считаются неразличимыми, то есть одинаковыми. В нашем же случае ионизаций частиц два процесса: в одном – первичный электрон произвел две ионизации, а рожденный электрон произвел одну ионизацию; в другом – первичный электрон произвел одну ионизацию, а рожденный электрон произвел две ионизации, и эти процессы разнятся существенно. Покажем это, например, при рассмотрении энергий. Если считать, что при ионизации энергия подлетевшего электрона ε делится пополам между этим и рожденным электроном, то в первом процессе все 4 электрона, вылетевшие из слоя умножения, будут иметь одинаковые энергии ε/4, а во втором процессе 4 электрона будут иметь энергии: ε/2, ε/4, ε/8, ε/16 соответственно.

Исходя из этого, следует учитывать все комбинации с переменой мест частей, на которые разбивается целое число. Рассмотрим такие разбиения для первых чисел натурального ряда и по аналогии с табл. 1 построим треугольник этих разбиений (табл. 2).

1
1
2 = 1 + 1
1 1
3 = 2 + 1 = 1 + 1 + 1
1 + 2
1 2 1
4 = 3 + 1 = 2 + 1 + 1 = 1 + 1 + 1 + 1
2 + 2 1 + 2 + 1
1 + 3 1 + 1 + 2
1 3 3 1

Таблица 2

Число частей

n	1	2	3	4	5	6	7	$p(n)$
1	1							1
2	1	1						2
3	1	2	1					4
4	1	3	3	1				8
5	1	4	6	4	1			16
6	1	5	10	10	5	1		32
7	1	6	15	20	15	6	1	64

Обращает на себя внимание, что число разбиений натурального числа полностью совпадает со строкой знаменитого треугольника Паскаля, в котором, как известно, числа в строке являются биномиальными коэффициентами. В известных книгах, как печатных, так и электронных, посвященных теории разбиений [4], треугольнику Паскаля [5], биному Ньютона и комбинаторике [6, 7], а также в классических справочниках [8, 9] и учебниках [10] этот факт отсутствует. Особенно удивительно, что даже в такой популярной брошюре [5], написанной специально для школьников, не говорится, что треугольник Паскаля можно получить простым подсчетом числа разбиений на части натурального числа, хотя, на наш взгляд, это самое простое объяснение, что такое треугольник Паскаля.

2(533).indd 113 23.06.2017 10:20:15

Для объяснения найденной взаимосвязи числа разбиений на части натурального числа и чисел в треугольнике Паскаля рассмотрим, например, случай с $n = 5$.

$$5 = 4 + 1 = 3 + 1 + 1 = 2 + 1 + 1 + 1 = 1 + 1 + 1 + 1 + 1$$

	3 + 2	2 + 2 + 1	1 + 2 + 1 + 1	
	2 + 3	1 + 3 + 1	1 + 1 + 2 + 1	
	1 + 4	2 + 1 + 2	1 + 1 + 1 + 2	
		1 + 2 + 2		
		1 + 1 + 3		
1	**4**	**6**	**4**	**1**

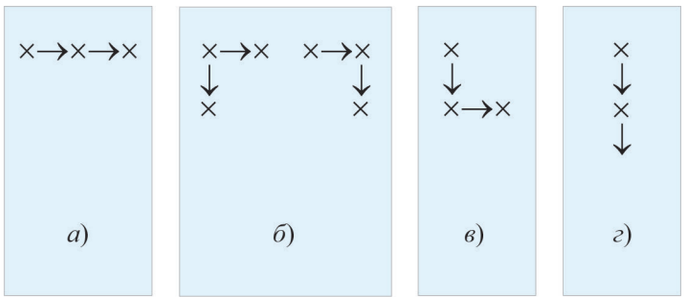
Видно, что число комбинаций в первой колонке – это число чисел от $n - 1$ до 1, которое равно биномиальному коэффициенту C_1^{n-1}. Число комбинаций во второй колонке – это число чисел от $n - 2$ до 1 плюс число чисел от $n - 3$ до 1 плюс число чисел от $n - 4$ до 1 и т. д. до числа чисел от $n - (n - 1)$ до 1, то есть $\sum_{k=2}^{n-1}(n-k) = \frac{(n-1)\cdot(n-2)}{2}$, а это не что иное, как следующий биномиальный коэффициент C_2^{n-1}, и т. д.

Учет комбинаций с переменой мест частей, на которые разбивается целое число, хотя и приблизил решение, но не позволил полностью решить нашу задачу. Для объяснения этого, вернемся к рассмотрению физической задачи ионизаций. При этом будем использовать схему ионизаций. Так, для рассмотренного выше случая *а*, когда первичный электрон произвел три ионизации и далее этот электрон и рожденные им три электрона пройдут слой без ионизаций, имеем

$$\begin{array}{ccccccc} \rightarrow & \times & \rightarrow & \times & \rightarrow & \times & \rightarrow \\ & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow & \end{array}$$

Здесь знак × означает ионизацию, а стрелка – движение электрона.

Схему можно упростить, если принять во внимание, что к каждой ионизации подлетает один электрон, а после ионизации движение продолжают два электрона (рис. *а*). Если первичный электрон произвел две ионизации, а рожденный электрон произвел одну ионизацию, то возможны две комбинации (рис. *б*). Если первичный электрон произвел одну ионизация, а рожденный две ионизации, то схема представлена на рис. *в*. Если первичный электрон произвел одну ионизация, рожденный одну ионизации и им рожденный электрон произвел одну ионизацию, то такая схема показана на рис. *г*.



Схемы комбинаций

2(533).indd 114 23.06.2017 10:20:15

Таким образом, подобно формулам (2) и (3), можно записать выражение для вероятности вылета из слоя умножения четырех электронов:

$$P(4) = p_3p_0^{\,3} + (2p_2p_1 + p_1p_2)p_0^{\,2} + p_1^{\,3}p_0 = p_3p_0^{\,3} + 3p_1p_2p_0^{\,2} + p_1^{\,3}p_0. \qquad (5)$$

В комбинациях с двумя ионизациями одним электроном и одной ионизацией одним электроном кроется различие физического рассмотрения ионизаций от математической теории разбиения ($2p_2p_1 + p_1p_2$ вместо $p_2p_1 + p_1p_2$). Отметим, что похожий с (5) вид имеет третий многочлен Белла, поэтому остановимся подробнее на многочленах и числах Белла [4, 6, 7] и выясним, насколько они применимы к решению нашей задачи.

Многочлены Белла получаются при рассмотрении сложной функции $h(t) = f(g(t))$. Первая ее производная по t равна $dh/dt = (df/dg)(dg/dt)$, вторая $d^2h/dt^2 = (d^2f/dg^2)(dg/dt)^2 + (df/dg)(d^2g/dt^2)$ и т. д. Если ввести обозначения: $h_k = d^kh/dt^k$, $f_k = d^kf/dg^k$, $g^k = d^kg/dt^k$, где $k = 1, 2, 3\ldots$, то получим многочлены Белла

$$h_1 = f_1g_1,$$
$$h_2 = f_2g_1^{\,2} + f_1g_2,$$
$$h_3 = f_3g_1^{\,3} + 3f_2g_2g_1 + f_1g_3,$$
$$h_4 = f_4g_1^{\,4} + 6f_3g_2g_1^{\,2} + f_2(3g_2^{\,2} + 4g_3g_1) + f_1g_4,$$
$$h_5 = f_5g_1^{\,5} + 10f_4g_2g_1^{\,3} + f_3(15g_2^{\,2}g_1 + 10g_3g_1^{\,2}) + f_2(10g_2g_3 + 5g_4g_1) + f_1g_5.$$

Видно, что первые три многочлена имеют внешнее сходство с выражениями для вероятностей (2), (3), (5), что является привлекательным моментом для решения нашей задачи. Еще более привлекательным является то, что все многочлены и числа Белла связаны с моментами распределения Пуассона (1). Поскольку $\sum_{k=1}^{n}\frac{u^n e^{-u}}{n!} = 1$, то, продифференцировав обе части по u, получим выражение для первого момента $\langle n\rangle = u$. Следующие дифференцирования дают рекуррентное выражение для момента любого порядка $\langle n^k\rangle = u\,(\langle n^{k-1}\rangle + d\langle n^{k-1}\rangle/du)$, $k = 2, 3,\ldots$ Отсюда, в частности, имеем

$$\langle n^2\rangle = u^2 + u,$$
$$\langle n^3\rangle = u^3 + 3u^2 + u,$$
$$\langle n^4\rangle = u^4 + 6u^3 + 7u^2 + u,$$
$$\langle n^5\rangle = u^5 + 10u^4 + 25u^3 + 15u^2 + u.$$

При $u = 1$ получаем числа Белла A_n: 1, 2, 5, 15, 52 и т. д., которые имеют ряд интересных свойств. В частности, любое число Белла находится по предыдущим: $A_{n+1} = \sum_{k=0}^{n} C_k^n A_k$; $\sum_{n=0}^{n} A_n \frac{u^n}{n!} = \exp(e^u - 1)$. Кроме того, имеется связь между числами Белла и числами Бернулли B_n, поскольку имеет место соотношение $\sum_{k=0}^{n-1} C_k^n B_k = 0\ (B_0 = 1)$.

По аналогии с табл. 1, 2 построим треугольник для чисел Белла (табл. 3).

2(533).indd 115 23.06.2017 10:20:16

Таблица 3

Число частей

$n-1$	1	2	3	4	5	A_n
1	1					1
2	1	1				2
3	1	3	1			5
4	1	6	7	1		15
5	1	10	25	15	1	52

Возвратимся к формуле (5), которая позволяет рассчитать коэффициент распределения вероятности (2) для $n = 4$.

$$P(4) = u^3 e^{-4u}\,[1/1!^3 + 3/(2!\ 1!)+1/3!]. \tag{6}$$

Для большего числа электронов количество комбинаций увеличивается. В результате их подсчета нами были получены следующие выражения для вероятностей:

$$P(5) = p_1^4 p_0 + 6p_1^2 p_2 p_0^2 + (2p_2^2 p_0^3 + 4p_3 p_1)p_0^3 + p_4 p_0^4 = \\ = u^4 e^{-5u}[1/(1!)^4 + 6/(2!\ 1!^2) + 2/2!^2 + 4/(3!\ 1!) + 1/4!], \tag{7}$$

$$P(6) = p_1^5 p_0 + 10p_1^3 p_2 p_0^2 + 10(p_2^2 p_1 + p_3 p_1^2)p_0^3 + 5(p_3 p_2 + p_4 p_1)p_0^4 + p_5 p_0^5 = \\ = u^5 e^{-6u}[1/(1!)^5 + 10/(2!1!^3) + 10/(2!^2\ 1!) + 10/(3!1!^2) + 5/(3!2!) + 5/(4!1!) + 1/5!], \tag{8}$$

$$P(7) = p_1^6 p_0 + 15p_1^4 p_2 p_0^2 + 10(3p_2^2 p_1^2 + 2p_3 p_1^3)p_0^3 + 5(6p_3 p_2 p_1 + 3p_4 p_1^2 + p_2^3)\,p_0^4 + 3(2p_4 p_2 + 2p_5 p_1 + \\ + p_3^2)p_0^5 + p_6 p_0^6 = u^6 e^{-7u}[1/(1!)^6 + 15/(2!\ 1!^4) + 30/(2!^2\ 1!^2) + 20/(3!\ 1!^3) + 30/(3!\ 2!\ 1!) + 15/(4!\ 1!^2) + \\ +5/2!^3 + 3/3!^2 + 6/(4!\ 2!) + 6/(5!\ 1!) + 1/6!]. \tag{9}$$

По аналогии с табл. 1…3 построим треугольник для числовых коэффициентов T_n (табл. 4) при одинаковых степенях p_0 в выражениях (2)…(9).

Таблица 4

Число частей

$n-1$	1	2	3	4	5	6	T_n
1	1						1
2	1	1					2
3	1	3	1				5
4	1	6	6	1			14
5	1	10	20	10	1		42
6	1	15	50	50	15	1	132

Видно, что для четырех и более ионизаций числа T_n не равны A_n. На наш взгляд, между ними существует связь, но найти ее нам пока не удалось.

Из формул (6)…(9) рассчитаем значения коэффициентов в распределении вероятности (2):

$C_4 = 1/1!^3 + 3/(2!\ 1!) + 1/3! = 8/3 = 4^3/4!$,

$C_5 = 1/(1!)^4 + 6/(2!\ 1!^2) + 2/2!^2 + 4/(3!\ 1!) + 1/4! = 125/24 = 5^4/5!$,

2(533).indd 116 23.06.2017 10:20:17

$C_6 = 1/(1!)^5 + 10/(2!\ 1!^3) + 10/(2!^2\ 1!) + 10/(3!\ 1!^2) + 5/(3!\ 2!) + 5/(4!\ 1!) + 1/5! = 54/5 = 6^5/6!$,

$C_7 = 1/(1!)^6 + 15/(2!\ 1!^4) + 30/(2!^2\ 1!^2) + 20/(3!\ 1!^3) + 30/(3!\ 2!\ 1!) + 15/(4!\ 1!^2) + 5/2!^3 + 3/3!^2 + 6/(4!\ 2!) + 6/(5!\ 1!) + 1/6! = 16807/720 = 7^6/7!$.

С учетом этих значений, а также найденных в [3] первых четырех значений: $C_1 = 1 = 1/1!$, $C_2 = 1 = 2^1/2!$, $C_3 = 3/2 = 3^2/3!$, $C_4 = 8/3 = 4^3/4!$ – получаем общее выражение для коэффициентов распределения (4):

$$C_n = \frac{n^{n-1}}{n!}. \tag{10}$$

В результате аналитическое выражение для распределения вероятности вылета из слоя умножения n электронов (4) принимает окончательный вид

$$P(n) = \frac{(un)^{n-1} e^{-un}}{n!}, \tag{11}$$

где $n! = n(n-1)\cdot\ldots\cdot 2\cdot 1$ (Приложение 1).

В этом выражении нет численных коэффициентов, поэтому оно носит общий характер и его можно использовать для любого сколь угодно большого числа электронов.

Поскольку из определения плотности вероятности

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(un)^{n-1} e^{-un}}{n!} = 1, \tag{12}$$

(доказательство дано в Приложении 2) то, продифференцировав обе части этого уравнения по u, получим тождество Лангранжа – Абеля

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{(un)^{n} e^{-un}}{n!} = \frac{1}{1-u}, \tag{13}$$

которое широко используется в комбинаторике [6].

Из формулы (12) легко найти выражение для первого момента распределения $P(n)$:

$$\langle n \rangle = 1/(1-u). \tag{14}$$

Дальнейшие дифференцирования формулы (14) позволяют получить рекуррентное выражение для момента любого порядка распределения $P(n)$:

$$\langle n^k \rangle = (\langle n^{k-1} \rangle + ud \langle n^{k-1} \rangle /du)/(1-u), \quad k = 2, 3, \ldots$$

Отсюда, в частности, находим

$\langle n^2 \rangle = \langle n \rangle^3$,

$\langle n^3 \rangle = 3 \langle n \rangle^5 - 2 \langle n \rangle^4$,

$\langle n^4 \rangle = 15 \langle n \rangle^7 - 20 \langle n \rangle^6 + 6 \langle n \rangle^4$,

$\langle n^5 \rangle = 105 \langle n \rangle^9 - 210 \langle n \rangle^8 + 130 \langle n \rangle^7 - 24 \langle n \rangle^6$ и т. д.

Полученные числовые коэффициенты также можно расположить в виде треугольника. Интересно, что сумма чисел с соответствующими знаками в каждой строке этого треугольника равна 1.

В заключение отметим, что поставленная и частично решенная А. С. Тагером задача вычисления плотности распределения вероятности для числа ионизированных частиц (электронов) оказалась связанной с многими задачами из теории разбиений целых чисел, комбинаторики, треугольником Паскаля и тождеством Лангранжа – Абеля.

2(533).indd 117 23.06.2017 10:20:17

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Для вычисления факториала $n!$ при больших n широко применяется формула Стирлинга, полученная при использовании для интегрирования формулы трапеции. Поскольку формула численного интегрирования Симпсона, использующая квадратные трехчлены, является более точной, то представляет интерес получить формулу для вычисления факториала $n!$ на основе формулы Симпсона.

Рассмотрим определенный интеграл функции $f(x) = \ln(x)$:

$$\int_1^n \ln(x)dx = n \cdot \ln(n) - n + 1. \qquad (П1)$$

Численное интегрирование функции $f(x)$ в пределах от a до b при использовании формулы трапеции

$$\int_a^b f(x)dx = \frac{h}{2}(y_0 + y_{n-1}) + y_1 + y_2 + \ldots + y_{n-2}$$

при $a = 1$, $b = n$, $h = 1$, $x_k = 1 + k$, $y_k = f(x_k)$ дает

$$\int_1^n \ln(x)dx = \frac{1}{2}(\ln(1) + \ln(n)) + \ln(2) + \ln(3) + \ln(4) \ldots + \ln(n-1) = \ln(n!) - \frac{1}{2}\ln(n). \qquad (П2)$$

Приравнивая (П1) и (П2), приходим к выражению

$$n! = n^n e^{-n} \cdot \sqrt{n} \cdot e. \qquad (П3)$$

Стирлинг, используя формулу трапеции и формулу Виллиса, получил уточненное выражение

$$n! = n^n e^{-n} \cdot \sqrt{n} \cdot \sqrt{2\pi} \cdot (1 + \frac{1}{12n}). \qquad (П4)$$

Для численного интегрирования функции $f(x)$ в пределах от a до b применим формулу Симпсона

$$\int_a^b f(x)dx = \frac{h}{3}(y_0 + 4y_1 + 2y_2 + 4y_3 \ldots + 4y_{n-1} + y_n).$$

Подставляя в правую часть значения функции, получим

$$\int_1^n \ln(x)dx = \frac{1}{3}[\ln(1) + \ln(n)] + [\ln(2) + \ln(3) + \ln(4) \ldots + \ln(n-1)] + \frac{1}{3}[\ln(2) - \ln(3) + \ln(4) \ldots + \ln(n-1)].$$

Используя формулу Эйлера для суммы $1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \ldots + \frac{1}{p} = \ln(p) + C$, где $C = 0{,}577218$ – постоянная Эйлера, преобразуем третье выражение в квадратных скобках:

$$\frac{1}{3}[\ln(2) - \ln(3) \ldots + \ln(n-1)] = -\frac{1}{3}\ln[\frac{3}{2} \cdot \frac{5}{4} \cdot \frac{7}{6} \ldots \cdot \frac{(n-2)}{(n-3)} \cdot \frac{1}{(n-1)}] =$$

$$= -\frac{1}{3}\ln[(1+\frac{1}{2})(1+\frac{1}{4})\ldots(1+\frac{1}{n-3})\frac{1}{n-1}] = -\frac{1}{3}[\ln(1+\frac{1}{2}) + \ln(1+\frac{1}{4}) + \ldots \ln(1+\frac{1}{n-3})] + \frac{1}{3}\ln(n-1) =$$

$$= -\frac{1}{3}[\frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{6} + \frac{1}{8} + \ldots + \frac{1}{n-3}] + \frac{1}{3}\ln(n-1) = -\frac{1}{6}[1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \ldots + \frac{1}{(n-3)/2}] + \frac{1}{3}\ln(n-1) =$$

$$= -\frac{1}{6}[\ln\frac{n-3}{2} + C] + \frac{1}{3}\ln(n-1).$$

Таким образом, получаем выражение для интеграла

$$\int_1^n \ln(x)dx = \frac{1}{3}\ln(n) + \ln(n!) - \ln(n) - \frac{1}{6}\ln(n) - \frac{1}{6}\ln(1 - \frac{3}{n}) + \frac{1}{6}\ln(2) - \frac{C}{6} + \frac{1}{3}\ln(n) + \frac{1}{3}\ln(1 - \frac{1}{n}).$$

2(533).indd 118 23.06.2017 10:20:18

После приведения подобных членов приходим к окончательному выражению для факториала

$$n! = n^n e^{-n} \cdot \sqrt{n} \cdot \exp(1 - \frac{\ln 2 - C}{6})(1 - \frac{1}{2n}). \qquad (П5)$$

Как и следовало ожидать, формулы (П3), (П4) и (П5) различаются численными множителями A_k:

$A_1 = e = 2,71828$; $A_2 = \sqrt{2\pi} = 2,50663$; $A_3 = \exp(1 - \frac{\ln 2 - C}{6}) = 2,65132$ – и поправочными членами.

Для $n = 10$ имеем точное значение $n! = 3,6288 \cdot 10^6$.

Формула (П4) дает значение $3,63436 \cdot 10^6$, формула (П5) – значение $3,6272 \cdot 10^6$.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Для доказательства формулы (12) вычислим сумму

$$A = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(u \cdot n)^{n-1} e^{-u \cdot n}}{n!} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(u \cdot n)^{n-1} \cdot (-1)^k \cdot (u \cdot n)^k}{n! \cdot k!} = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \cdot \frac{u^{n+k-1} \cdot n^{n+k-1}}{n! \cdot k!}.$$

Обозначая $m = n + k$ и используя выражение для биномиальных коэффициентов $C_k^m = \frac{m!}{k! \cdot (m-k)!}$, приходим к выражению $A = 1 + \sum_{m=2}^{\infty} \frac{u^{m-1}}{m!} \sum_{k=0}^{m-1} (-1)^k \cdot C_k^m \cdot (m-k)^{m-1}$.

В работе [11] было показано, что $\sum_{k=0}^{m-1} (-1)^k \cdot C_k^m \cdot (m-k)^{m-1} = 0$ при любом $m > 1$, поэтому $A = 1$.

ЛИТЕРАТУРА

1.Т**агер, А. С.** Генерация и усиление колебаний СВЧ с помощью диодов с динамическим отрицательным сопротивлением: докторская диссертация / А. С. Тагер. – 1962.

2. **Тагер, А. С.** Лавинно-пролетные диоды и их применение в технике СВЧ / А. С. Тагер и В. М. Вальд-Перлов. – М.: Советское радио, 1968.

3. **Тагер, А. С.** Флюктуации тока в полупроводнике (диэлектрике) в условиях ударной ионизации и лавинного пробоя / А. С. Тагер // ФТТ. – 1964. – Т. 6.

4. **Эндрюс, Г.** Теория разбиений / Г. Эндрюс; пер. с англ. Б. С. Стечкина. – М.: Наука, 1982.

5. **Успенский, В. А.** Треугольник Паскаля: популярные лекции по математике / В. А. Успенский. – Вып. 43. – М.: Наука, 1979.

6. **Риордан, Д. Ж.** Комбинаторные тождества / Д. Ж. Риордан. – М.: Наука, 1982.

7. **Сачков, В. Н.** Введение в комбинаторные методы дискретной математики / В. Н. Сачков. – М.: Наука, 1982.

8. **Бронштейн, И. Н.** Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – М.: Наука, 1986. – 550 с.

9. **Корн, Г.** Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1968. – 720 с.

10. **Полиа, Г.** Задачи и теоремы из анализа / Г. Полиа, Г. Сеге. – М.: Наука, 1978.

11. **Балыко, И. А.** Выражения для сумм рядов с биномиальными коэффициентами / И. А. Балыко, А. К. Балыко // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2012. – Вып. 4 (515). – С. 49 – 54.

Статья поступила 21 февраля 2017 г.

2(533).indd 119 23.06.2017 10:20:19

ПРАВИЛА НАПРАВЛЕНИЯ, РЕЦЕНЗИРОВАНИЯ И ОПУБЛИКОВАНИЯ НАУЧНЫХ СТАТЕЙ В НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОМ СБОРНИКЕ «ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА», СЕРИЯ 1, «СВЧ-ТЕХНИКА»

1. Статья должна иметь официальное направление от учреждения, в котором выполнена работа, и документ, подтверждающий возможность открытого публикования (акт экспертизы).

2. Статья должна содержать:

- соответствующий индекс универсальной десятичной классификации литературы (УДК);
- инициалы и фамилии авторов;
- название;
- реферат;
- ключевые слова;
- текст самой статьи;
- список литературы;
- краткие сведения об авторах, включающие фамилию, имя, отчество (полностью), город, место работы, домашний и электронный адрес, телефон.

Объем публикуемой статьи, как правило, до 12 стр., включая иллюстрации.

3. Статья должна быть подготовлена в текстовом редакторе MS Word для Windows и передана в виде файла (формат .doc или .docs) по электронной почте, либо записанного на ФЛЭШ или оптическом (CD) носителе, и двух печатных экземпляров.

4. Форматирование статьи: одинарный межстрочный интервал, выравнивание текста по ширине, абзацный отступ – 0,7 см. При наборе текста используются только стандартные True Type шрифты – Times New Roman и Symbol. Размер шрифта основного текста – 12 пунктов, примечаний и ссылок – 10 пунктов. Устанавливаемый размер бумаги – А4 (210 × 297 мм).

Сложные формулы набираются только в “Редакторе формул” Word. Непосредственно в Worde допускается использование только простых формул (символы с индексами, подстрочными и/или надстрочными). Не принимаются формулы, выполненные в виде рисунков. Расшифровка буквенных обозначений формул в тексте должна быть набрана в текстовом редакторе. Таблицы выполняются в формате Word.

5. Иллюстрации к статье представляются в виде отдельных файлов.

Рисунки выполняются в соответствии со следующими требованиями:

- растровые рисунки – в формате TIFF, разрешение не менее 300 точек/дюйм (для полутоновых фотографий допускается формат JPEG); векторная графика – в формате CorelDRAW, WMF;
- размер рисунка – не более 17 × 20 см;
- буквенные и цифровые обозначения на рисунках должны соответствовать обозначениям в тексте, причем начертание греческих и русских букв прямое, а латинских букв и цифр, обозначающих номера позиций, – курсивное;
- текстовая информация, не являющаяся неотъемлемой частью рисунка, и условные обозначения выносятся в текст статьи или в подпись к рисунку.

Фотографии (не более 18 × 24 см) принимаются в электронном виде.

На весь иллюстративный материал должны быть ссылки в тексте.

6. Следует строго соблюдать единообразие терминов, размерностей, условных обозначений, сокращений. Единицы измерения должны соответствовать системе СИ.

7. Формулы следует нумеровать в круглых скобках, например (2), литературные ссылки – в прямых, например [2], подстрочные замечания отмечаются звездочками *.

8. Таблицы должны иметь тематические заголовки. Все слова в заголовках граф даются без сокращений и в единственном числе.

9. Библиография составляется в соответствии с ГОСТ 7.1 – 2003 и дается общим списком в конце статьи.

10. Полученная статья направляется редакцией на рецензирование ведущим специалистам в данной научно-технической области.

11. Итоговое решение об одобрении или отклонении представленных в редакцию материалов принимается редакционной коллегией на основании заключения рецензентов, о чем авторы ставятся в известность.

12. Редакция направляет авторам представленных материалов копии рецензий или мотивированный отказ, а также обязуется направлять копии рецензий в Министерство образования и науки Российской Федерации при поступлении в редакцию издания соответствующего запроса. Рецензии на все опубликованные статьи хранятся в редакции издания 5 лет.

13. Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

2(533).indd 120 23.06.2017 10:20:19

ПРОВОДИТСЯ ПОДПИСКА

на научно-технический сборник «Электронная техника», серия 1, «СВЧ-техника» на 2017 г. (4 вып. в год). Стоимость подписки – 3600 руб., включая НДС (18 %). Издается в цветном варианте.

Журнал зарегистрирован Министерством Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций (свидетельство ПИ № ФС 77-24651 от 6 июня 2006 г.) и включен в перечень ВАК (перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук).

Для оформления подписки необходимо произвести оплату по указанным ниже банковским реквизитам: АО «НПП «Исток» им. Шокина», ОГРН 1135050007400, ИНН 5050108496, КПП 509950001, р/с 40702810840020011663, ПАО Сбербанк России, г. Москва, БИК 044525225, к/с 30101810400000000225 – и выслать копию платежного поручения и бланк-заказ по адресу: 141190, г. Фрязино, Московская обл., ул. Вокзальная, 2а, АО «НПП «Исток» им. Шокина», ОНТИ; тел./факс: (495)465-86-12. Счет-фактура высылается заказчику после получения оформленных документов на подписку.

З А К А З

Прошу принять подписку на научно-технический сборник "Электронная техника", серия 1, "СВЧ-техника" на 2017 г. и направлять по адресу:

Куда _____
(почтовый индекс, адрес)
_____

Кому _____
(название организации)
_____

Заказ оплачен платежным поручением № _____ дата _____
на сумму _____ за _____ экз.

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

«СВЧ-ТЕХНИКА»

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

Редактор Хоточкина Л.Н.
Переводчик Барабанова Л.В.
Компьютерная верстка Земскова Л.А.
Коррекция рисунков Лазарева Т.В.

Подписано к печати 15.6.2017 г.	Усл. п. л. 14,75	Формат 60×88 1/8
Отпечатано в ООО "КУТИНОВ ПРИНТ"	Уч.-изд. л. 15,25	Тираж 500
г. Москва	Индекс 36292	10 статей

АО «НПП «Исток» им. Шокина» 141190, г. Фрязино, Московская обл., ул. Вокзальная, 2а
Тел.: (495)465-86-12. Факс: (495)465-86-12
E-mail: istokstebunov@mail.ru; info@istokmw.ru

2(533).indd 121 23.06.2017 10:20:19

Электронная техника. Сер. 1, СВЧ-техника, 2017, вып. 2(533), с. 1-120

ISSN 1990-9012

Подписной индекс 36292
в каталоге агентства «Роспечать»

2(533).indd 122 23.06.2017 10:20:20